

QU'EST-CE QU'UNE PARTICULE ÉLÉMENTAIRE ?

Camilla Maiani
12.05.2016
visite classe 1ere S



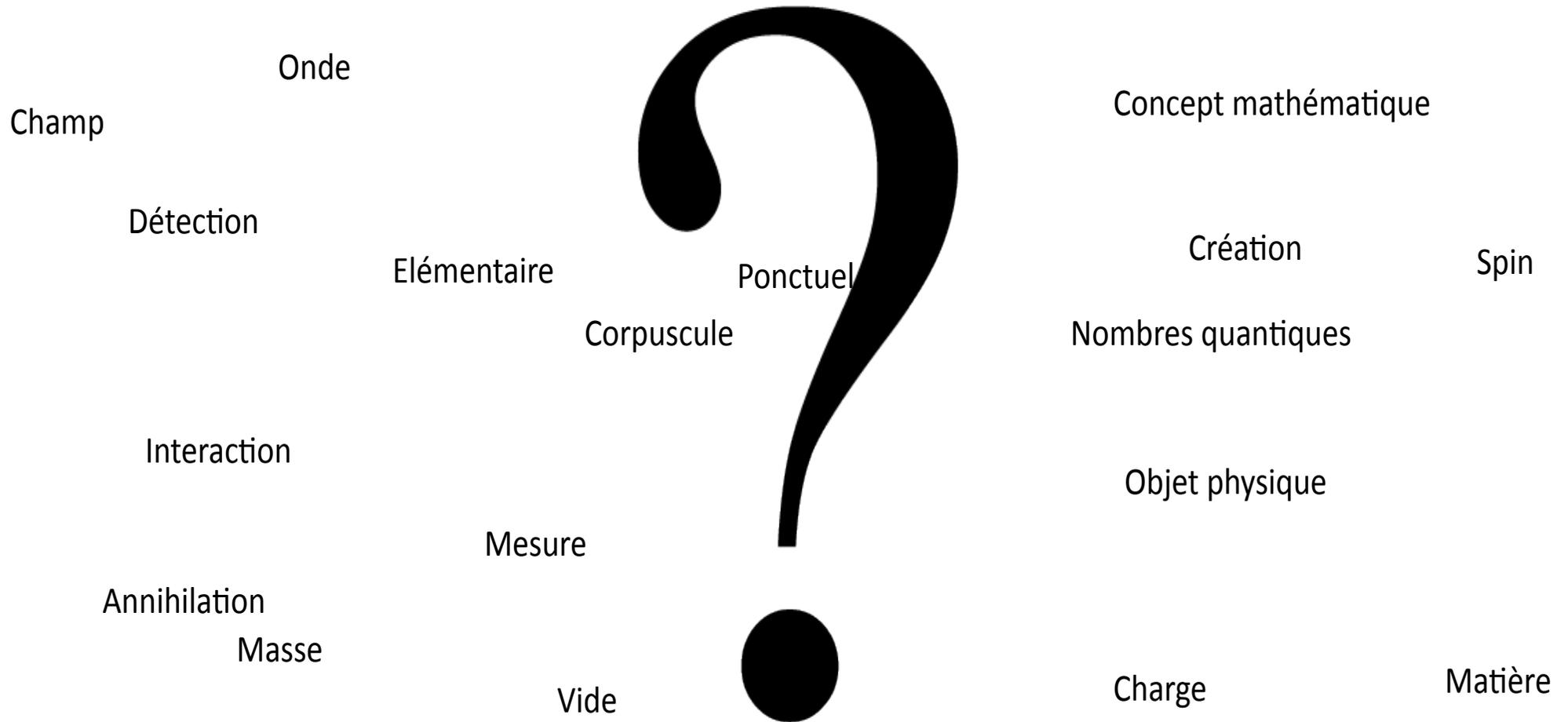
LA PHYSIQUE DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES EN (TRÈS) BREF

 Physique des particules élémentaires
étude de la nature petite partie qui constitue l'élément

- de quoi l'Univers est-il composé ?
- comment interagissent ses composants élémentaires ?

**on va recommencer des bases...qu'est-ce qu'un
particule élémentaire?**

BONNE QUESTION !



COMMENÇONS AVEC UNE TABLE...

Définition (Larousse): meuble sur pieds
offrant une surface plane destiné à un
usage déterminé

de quoi c'est composé
et à quoi ca sert

mais l'important c'est aussi quand on pose la question !



XVIIe siècle



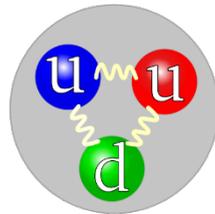
années 20



aujourd'hui

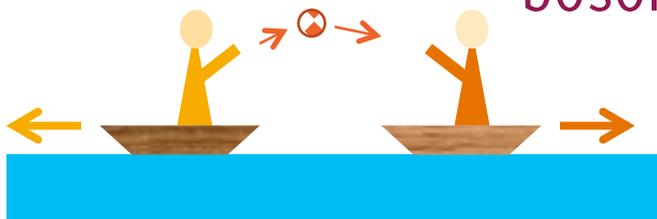
À QUOI 'CA SERT'?

- constituant fondamental
(à ce jour...)



fermion

- médiateur d'interaction



boson vecteur

- masse inertielle

boson de Higgs

Le boson de Higgs
donne la masse aux
autres particules



tu es grosse!

"Piled Higher and Deeper" by Jorge Cham
www.phdcomics.com

DE QUOI C'EST COMPOSÉ ?

ca dévient compliqué...
(merci d'attendre la suite)

QUAND?



QUAND?

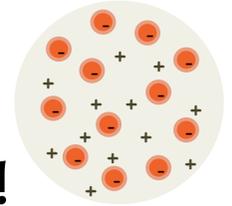
V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs



QUAND?

V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs

XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !

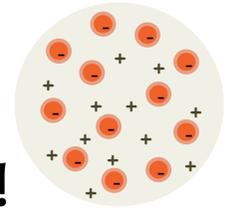


QUAND?

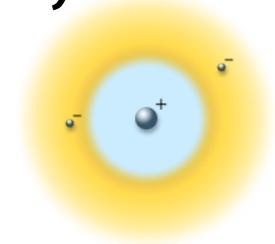
V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs



XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !



1911 ✦ Rutherford, Geiger, Mardsen : découverte du noyau atomique

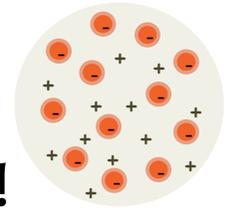


QUAND?

V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs

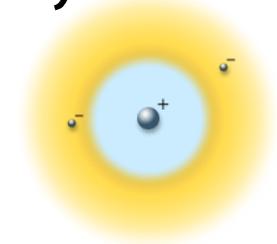


XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !



1911 ✦ Rutherford, Geiger, Mardsen : découverte du noyau atomique

1919 ✦ Rutherford : découverte du proton



QUAND?

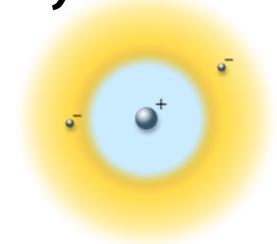
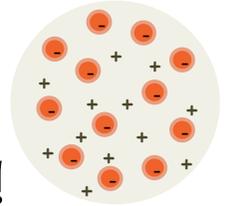
V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs

XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !

1911 ✦ Rutherford, Geiger, Mardsen : découverte du noyau atomique

1919 ✦ Rutherford : découverte du proton

1932 ✦ Chadwick : découverte du neutron



QUAND?

V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs

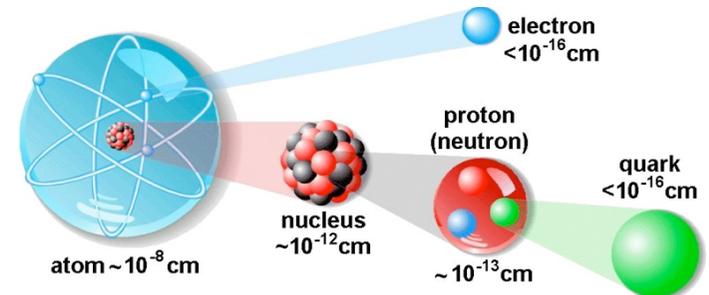
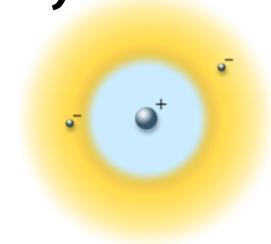
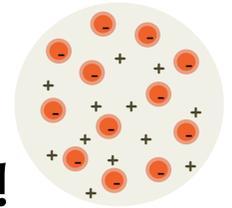
XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !

1911 ✦ Rutherford, Geiger, Mardsen : découverte du noyau atomique

1919 ✦ Rutherford : découverte du proton

1932 ✦ Chadwick : découverte du neutron

1964 ✦ Gell-Mann, Zweig : quark model



QUAND?

V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs

XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !

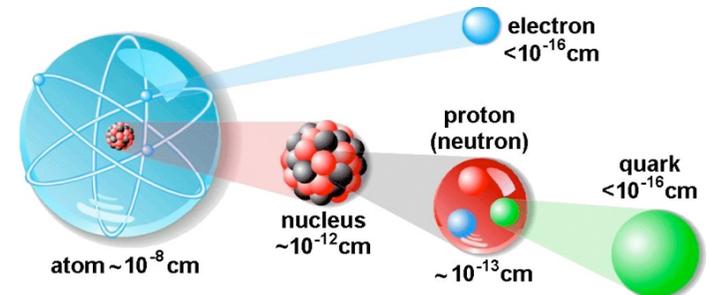
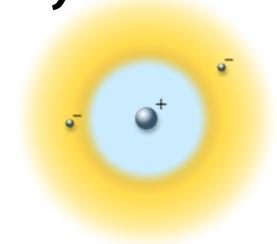
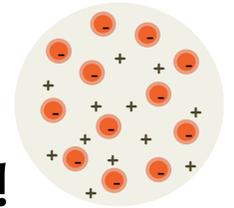
1911 ✦ Rutherford, Geiger, Mardsen : découverte du noyau atomique

1919 ✦ Rutherford : découverte du proton

1932 ✦ Chadwick : découverte du neutron

1964 ✦ Gell-Mann, Zweig : quark model

XXI^{ème} siècle ✦ ???



QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

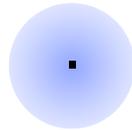
- ★ Objet élémentaire → pas de structure interne

QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

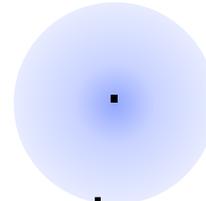
★ Objet élémentaire → pas de structure interne **“point matériel”**



distant



plus proche



plus proche encore

taille nulle

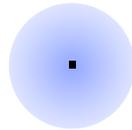
effets (quantiques) étendus

QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

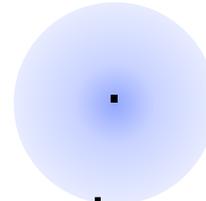
★ Objet élémentaire → pas de structure interne **“point matériel”**



distant



plus proche



plus proche encore

taille nulle

effets (quantiques) étendus

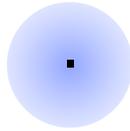
expérimentalement ?

QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

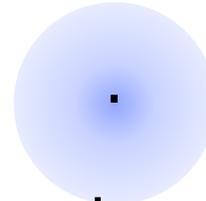
★ Objet élémentaire → pas de structure interne “point matériel”



distant



plus proche



plus proche encore

taille nulle

effets (quantiques) étendus

expérimentalement ?

★ En mécanique classique: énergie transférée au point matériel = énergie cinétique du point matériel

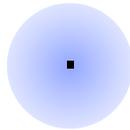
NB: si l'objet a des degrés de libertés internes, l'énergie peut exciter ceux-ci → sphère

QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

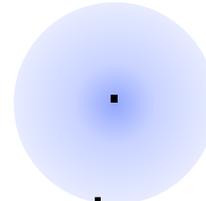
- ★ Objet élémentaire → pas de structure interne “point matériel”



distant



plus proche



plus proche encore

taille nulle

effets (quantiques) étendus

expérimentalement ?

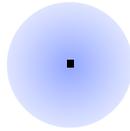
- ★ **En mécanique classique:** énergie transférée au point matériel = énergie cinétique du point matériel
NB: si l'objet a des degrés de libertés internes, l'énergie peut exciter ceux-ci → sphère
- ★ **En mécanique quantique:** l'énergie des degrés de liberté internes d'une particule n'est pas continue, ne peut assumer qu'une série discrète de valeurs: $E_0, E_1, E_2, ..$ → énergie de seuil $E_s = E_1 - E_0$

QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

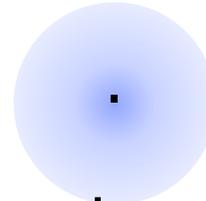
- ★ Objet élémentaire → pas de structure interne “point matériel”



distant



plus proche



plus proche encore

taille nulle

effets (quantiques) étendus

expérimentalement ?

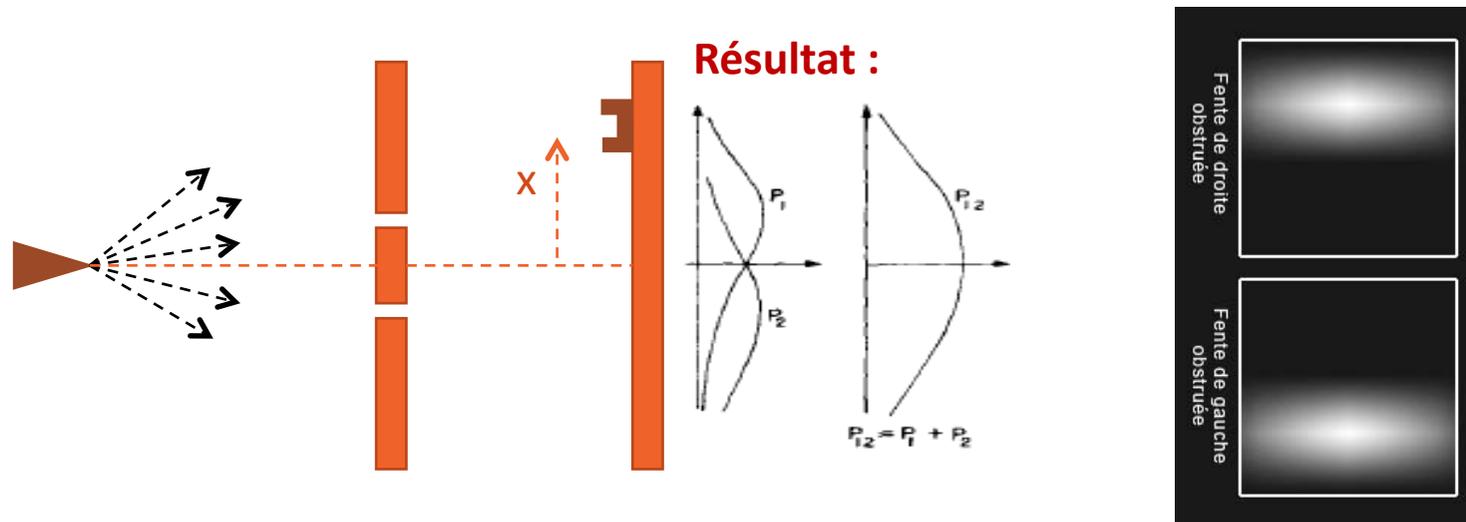
- ★ **En mécanique classique:** énergie transférée au point matériel = énergie cinétique du point matériel
NB: si l'objet a des degrés de libertés internes, l'énergie peut exciter ceux-ci → sphère
- ★ **En mécanique quantique:** l'énergie des degrés de liberté internes d'une particule n'est pas continue, ne peut assumer qu'une série discrète de valeurs: $E_0, E_1, E_2, ..$ → énergie de seuil $E_s = E_1 - E_0$
 - **ca dépend de l'énergie à disposition !** → “hautes énergies”
 - **on ne peut jamais démontrer qu'une particule est élémentaire**

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 1, CORPUSCULE

- ★ La source émet aléatoirement des billes identiques et incassables
- ★ Les deux fentes sont juste suffisamment larges pour laisser passer les billes
- ★ On compte le nombre de billes en x , on divise par le nombre total de billes passées par la fente → probabilité qu'une bille passée par la fente arrive en x

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 1, CORPUSCULE

- ★ La source émet aléatoirement des billes identiques et incassables
- ★ Les deux fentes sont juste suffisamment larges pour laisser passer les billes
- ★ On compte le nombre de billes en x , on divise par le nombre total de billes passées par la fente → probabilité qu'une bille passée par la fente arrive en x

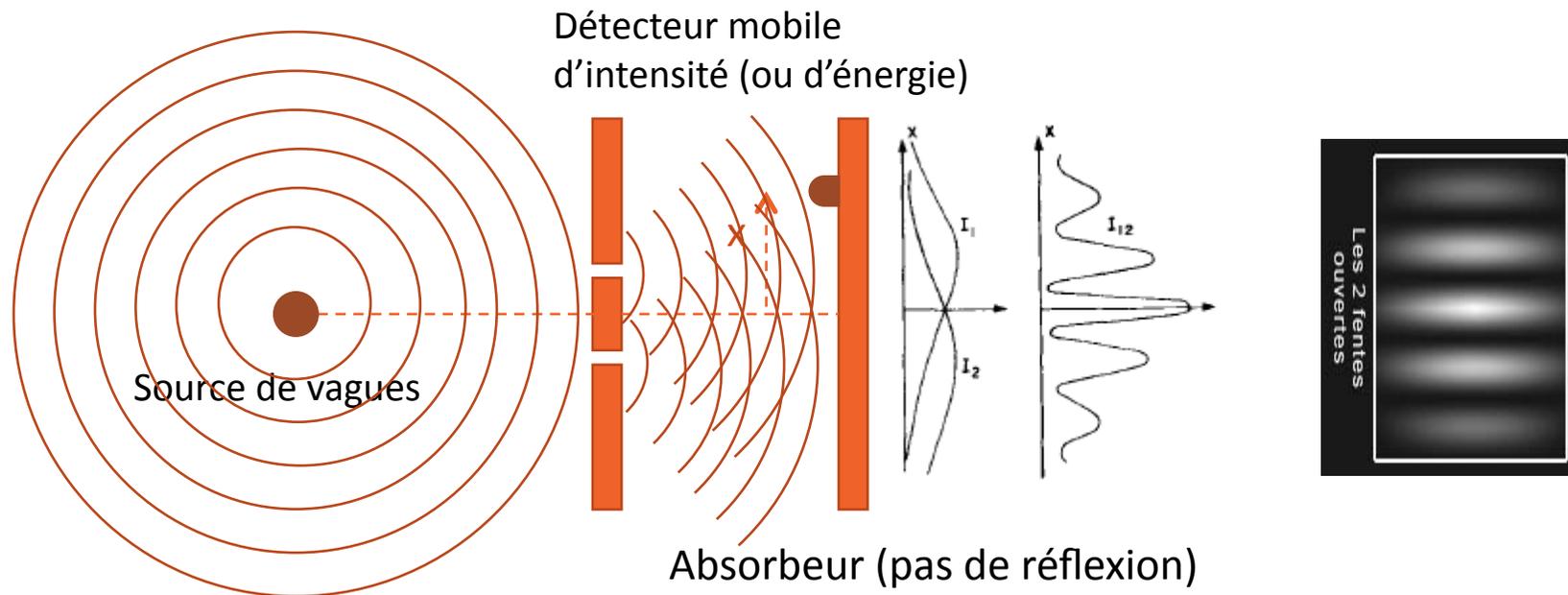


DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 2, ONDE

- ★ Meme exercice mais avec des ondes
- ★ Le détecteur est sensible à l'intensité des ondes
- ★ Si les deux fentes sont ouvertes → figure d'interférence

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 2, ONDE

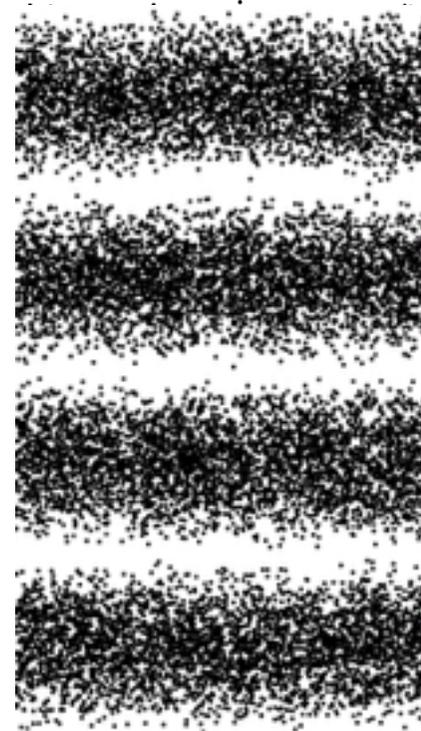
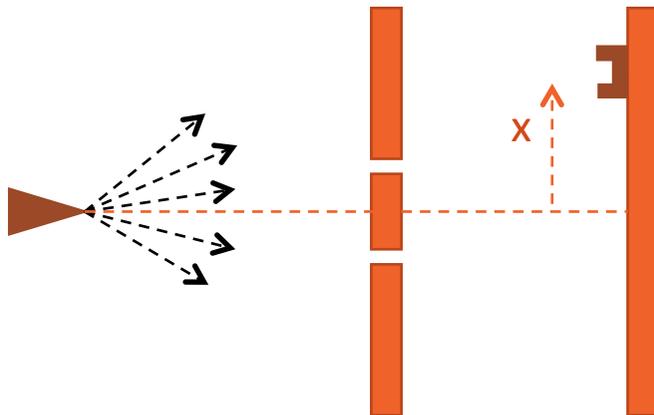
- ★ Meme exercice mais avec des ondes
- ★ Le détecteur est sensible à l'intensité des ondes
- ★ Si les deux fentes sont ouvertes → figure d'interférence



DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 3, DUALITÉ

maintenant on utilise des électrons

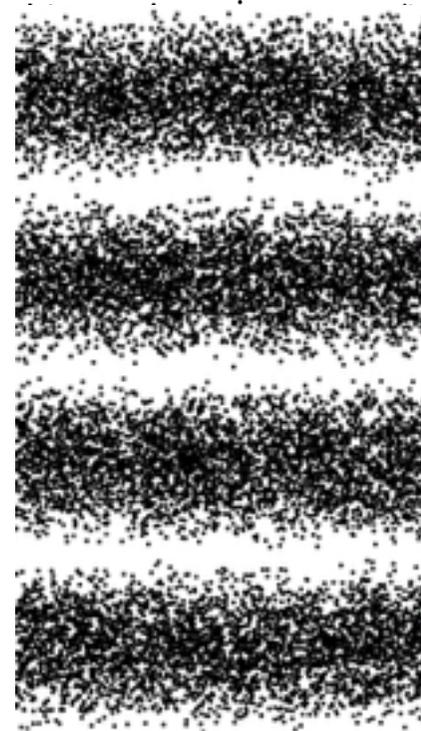
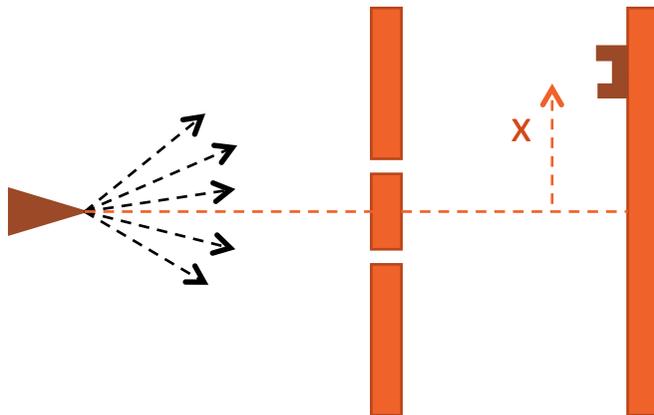
- ★ On compte bien les électrons unité par unité dans le détecteur **MAIS** on obtient une figure d'interférence si on calcule la probabilité
 - les électrons passent "par les deux fentes" (comme une onde) mais se révèlent corpusculaires dans le détecteur



DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 3, DUALITÉ

maintenant on utilise des électrons

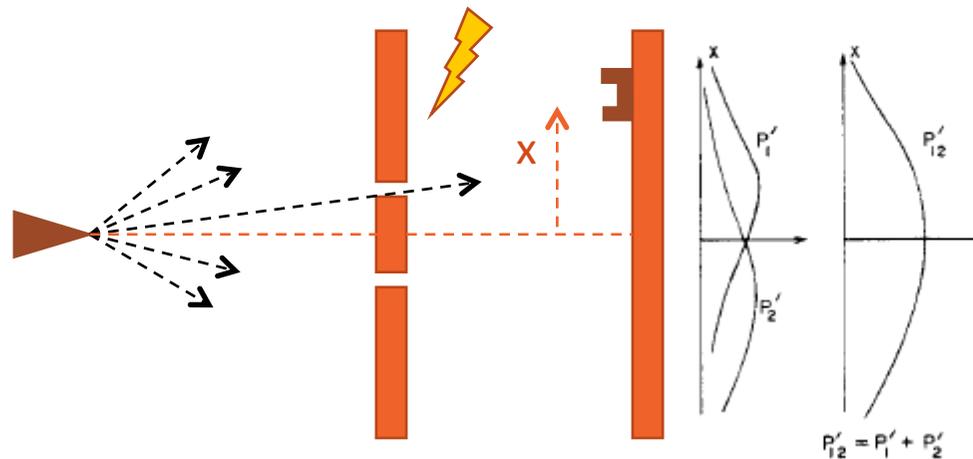
- ★ On compte bien les électrons unité par unité dans le détecteur **MAIS** on obtient une figure d'interférence si on calcule la probabilité
 - les électrons passent "par les deux fentes" (comme une onde) mais se révèlent corpusculaires dans le détecteur



DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 3, DUALITÉ

- ★ Si l'on éclaire (par exemple) la sortie des fentes avec une lumière d'une longueur d'onde susceptible d'être diffusée par les électrons

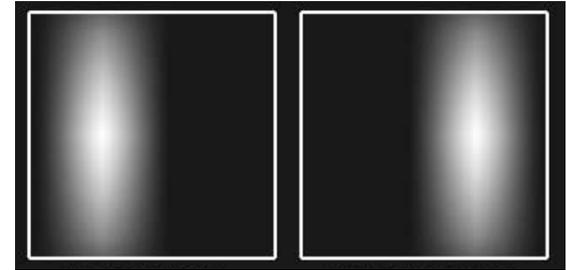
La figure d'interférence a disparu!



La mesure de la position de l'électron a révélé sa nature corpusculaire. Les franges réapparaissent quand on éteint le dispositif.

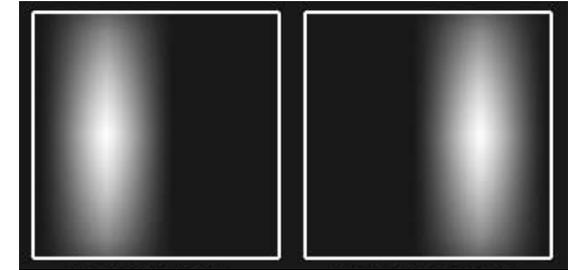
DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: RÉCAPITULATIF

★ Quand on observe le corpuscule on voit ça

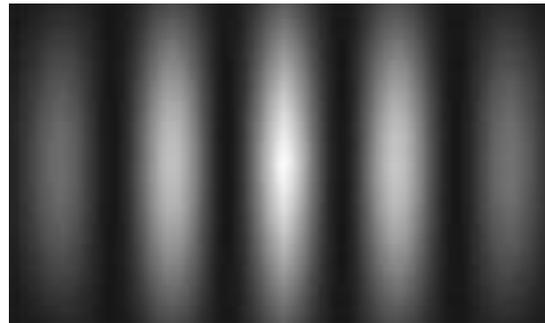


DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: RÉCAPITULATIF

★ Quand on observe le corpuscule on voit ça



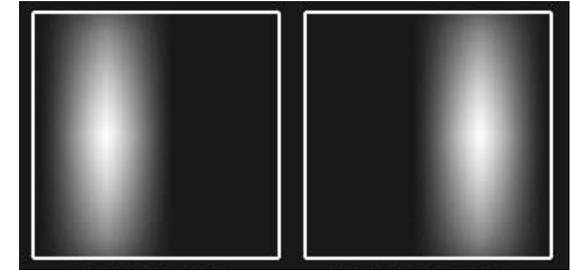
★ Quand on observe ça
passé le corpuscule



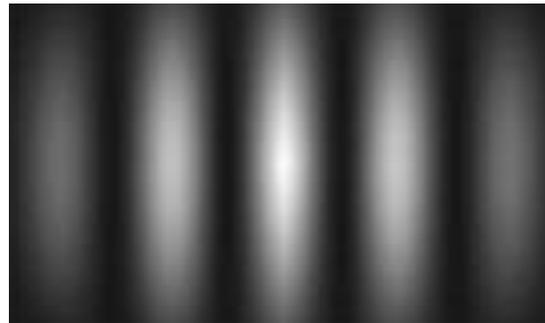
on ne sait pas par où est

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: RÉCAPITULATIF

★ Quand on observe le corpuscule on voit ça



★ Quand on observe ça
passé le corpuscule



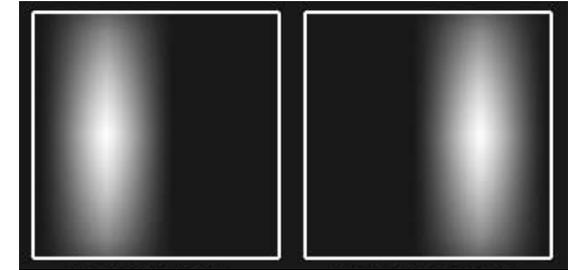
on ne sait pas par où est

★ On en déduit que:

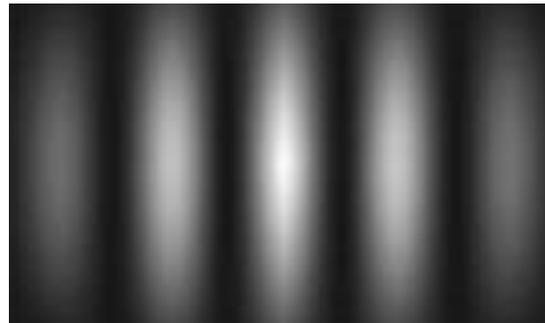
- ▶ une mesure perturbe le système
- ▶ pas de trajectoire classique ! l'électron passe par les deux fentes à la fois

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: RÉCAPITULATIF

★ Quand on observe le corpuscule on voit ça



★ Quand on observe ça
passé le corpuscule



on ne sait pas par où est

★ On en déduit que:

- ▶ une mesure perturbe le système
- ▶ pas de trajectoire classique ! l'électron passe par les deux fentes à la fois

dualité onde et corpuscule: particule décrite par une **fonction d'onde** → densité de probabilité de l'**observable** (position, vitesse, ..)

...JUSQUE LA

- ★ On a essayé de définir
qu'est-ce qu'un
particule élémentaire
- ★ Dualité onde/particule
→ théorie quantique
des champs
- ★ Ces champs
interagissent !

...JUSQUE LA

- ★ On a essayé de définir qu'est-ce qu'une particule élémentaire
- ★ Dualité onde/particule → théorie quantique des champs
- ★ Ces champs interagissent !

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = \mathcal{L}_{\text{Dirac}} + \mathcal{L}_{\text{mass}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}/\psi} . \quad (1)$$

Here,

$$\mathcal{L}_{\text{Dirac}} = i\bar{e}_L^i \not{\partial} e_L^i + i\bar{\nu}_L^i \not{\partial} \nu_L^i + i\bar{e}_R^i \not{\partial} e_R^i + i\bar{u}_L^i \not{\partial} u_L^i + i\bar{d}_L^i \not{\partial} d_L^i + i\bar{u}_R^i \not{\partial} u_R^i + i\bar{d}_R^i \not{\partial} d_R^i ; \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{\text{mass}} = -v \left(\lambda_e^i \bar{e}_L^i e_R^i + \lambda_u^i \bar{u}_L^i u_R^i + \lambda_d^i \bar{d}_L^i d_R^i + \text{h.c.} \right) - M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{M_W^2}{2 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu ; \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}} = -\frac{1}{4} (G_{\mu\nu}^a)^2 - \frac{1}{2} W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu} - \frac{1}{4} Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \mathcal{L}_{WZA} , \quad (4)$$

where

$$\begin{aligned} G_{\mu\nu}^a &= \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - g_3 f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c \\ W_{\mu\nu}^\pm &= \partial_\mu W_\nu^\pm - \partial_\nu W_\mu^\pm \\ Z_{\mu\nu} &= \partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu \\ F_{\mu\nu} &= \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu , \end{aligned} \quad (5)$$

and

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{WZA} &= ig_2 \cos \theta_W \left[(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\nu^- W_\mu^+) \partial^\mu Z^\nu + W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu} Z^\nu - W_{\mu\nu}^- W^{+\mu} Z^\nu \right] \\ &+ ie \left[(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\nu^- W_\mu^+) \partial^\mu A^\nu + W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu} A^\nu - W_{\mu\nu}^- W^{+\mu} A^\nu \right] \\ &+ g_2^2 \cos^2 \theta_W \left(W_\mu^+ W_\nu^- Z^\mu Z^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu Z^\nu \right) \\ &+ g_2^2 \left(W_\mu^+ W_\nu^- A^\mu A^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu} A_\nu A^\nu \right) \\ &+ g_2 e \cos \theta_W \left[W_\mu^+ W_\nu^- (Z^\mu A^\nu + Z^\nu A^\mu) - 2W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu A^\nu \right] \\ &+ \frac{1}{2} g_2^2 \left(W_\mu^+ W_\nu^- \right) \left(W^{+\mu} W^{-\nu} - W^{+\nu} W^{-\mu} \right) ; \end{aligned} \quad (6)$$

and

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}/\psi} = -g_3 A_\mu^a J_{(3)}^{\mu a} - g_2 \left(W_\mu^+ J_{W^+}^\mu + W_\mu^- J_{W^-}^\mu + Z_\mu J_Z^\mu \right) - e A_\mu J_A^\mu , \quad (7)$$

where

$$\begin{aligned} J_{(3)}^{\mu a} &= \bar{u}^i \gamma^\mu T_{(3)}^a u^i + \bar{d}^i \gamma^\mu T_{(3)}^a d^i \\ J_{W^+}^\mu &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\bar{\nu}_L^i \gamma^\mu e_L^i + V^{ij} \bar{u}_L^i \gamma^\mu d_L^j \right) \\ J_{W^-}^\mu &= (J_{W^+}^\mu)^* \\ J_Z^\mu &= \frac{1}{\cos \theta_W} \left[\frac{1}{2} \bar{\nu}_L^i \gamma^\mu \nu_L^i + \left(-\frac{1}{2} + \sin^2 \theta_W \right) \bar{e}_L^i \gamma^\mu e_L^i + (\sin^2 \theta_W) \bar{e}_R^i \gamma^\mu e_R^i \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{u}_L^i \gamma^\mu u_L^i + \left(-\frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{u}_R^i \gamma^\mu u_R^i \right. \\ &\quad \left. + \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{d}_L^i \gamma^\mu d_L^i + \left(\frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{d}_R^i \gamma^\mu d_R^i \right] \\ J_A^\mu &= (-1) \bar{e}^i \gamma^\mu e^i + \left(\frac{2}{3} \right) \bar{u}^i \gamma^\mu u^i + \left(-\frac{1}{3} \right) \bar{d}^i \gamma^\mu d^i . \end{aligned} \quad (8)$$

Lagrangien du Modèle Standard

LE MODÈLE STANDARD AUJOURD'HUI: MATIÈRE

12 constituants élémentaires

→ et leur anti-particules !

	I	II	III
Quarks	u	c	t
	d	s	b
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ

Three Generations of Matter



→ fermions (spin semi-entier)

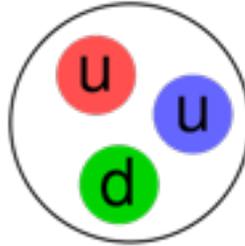
→ on ne sait pas pourquoi il y a 3 générations !

→ ils ont tous été observés expérimentalement

+ un boson de Higgs qui donne la masse aux particules

LE MODÈLE STANDARD AUJOURD'HUI: INTERACTIONS

Forte ↔ gluons



Intensité 1

↙
par convention

MS

Electromagnétique ↔ photon



Intensité ~ 0.01 [10⁻²]

Faible ↔ bosons W[±], Z⁰



Intensité ~ 0.0000001 [10⁻⁷]

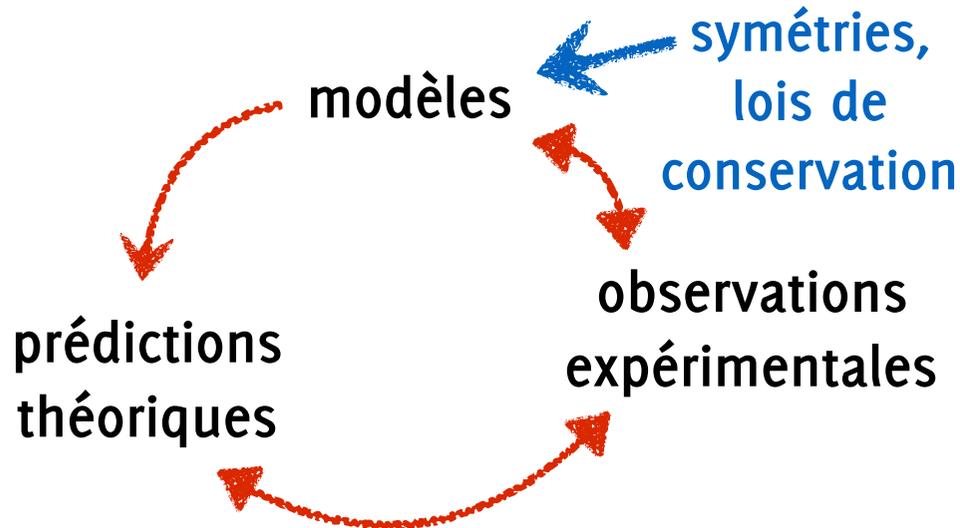
Gravitationnelle ↔ graviton?



Intensité ~ beaucoup de zéros [10⁻⁴²]

COMMENT SAVOIR SANS VOIR?

Notre démarche

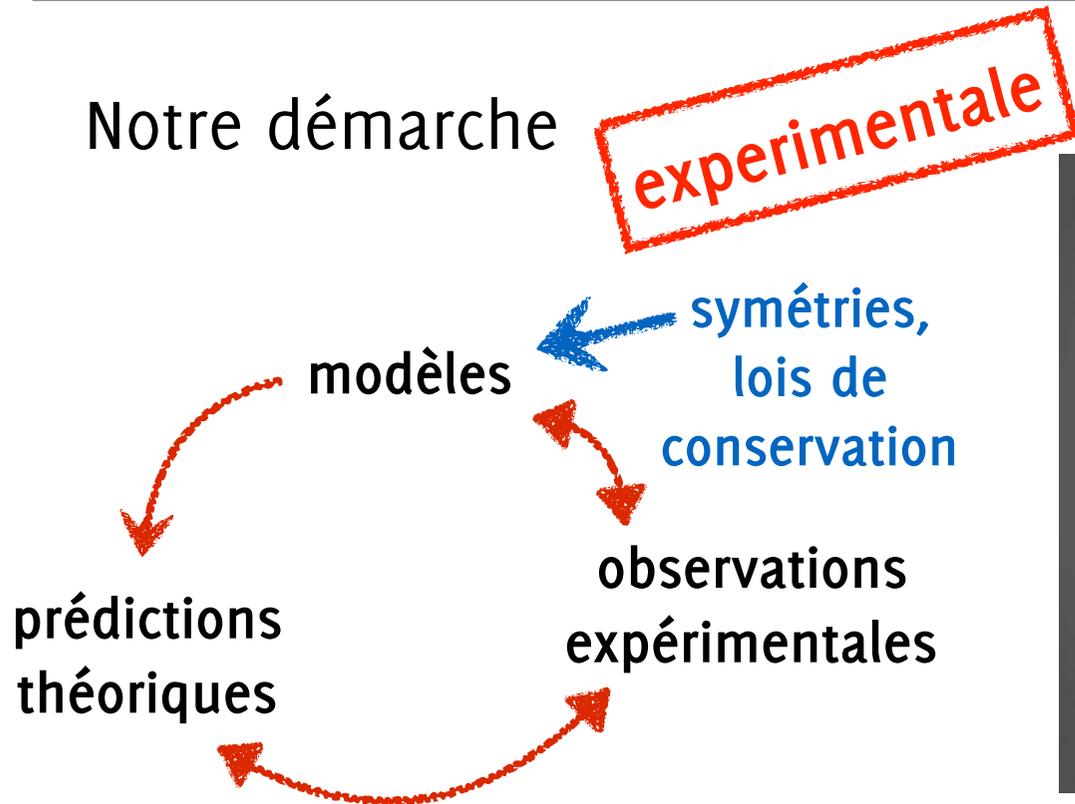


“Peu importe à quel point ta théorie est belle, peu importe à quel point tu es intelligent(e). Si elle n’est pas confirmée par l’expérience, elle est fausse.”

R. Feynman (très librement traduit par moi)

il ne faut pas perdre de vue que la physique est une science expérimentale !!

COMMENT SAVOIR SANS VOIR?



“Peu importe à quel point ta théorie est belle, peu importe à quel point tu es intelligent(e). Si elle n’est pas confirmée par l’expérience, elle est fausse.”
R. Feynman (très librement traduit par moi)



il ne faut pas perdre de vue que la physique est une science expérimentale !!

PREMIERS PAS DU MODÈLE STANDARD



P.A.M. Dirac

1928, Dirac écrit:

ca contient toutes les **propriétés de l'électron**

PREMIERS PAS DU MODÈLE STANDARD



P.A.M. Dirac

1928, Dirac écrit:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

ca contient toutes les **propriétés** de l'électron

PREMIERS PAS DU MODÈLE STANDARD



P.A.M. Dirac

1928, Dirac écrit:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

ca contient toutes les **propriétés de l'électron**

(en fait ca décrit tout fermion !)

lepton, quark

PREMIERS PAS DU MODÈLE STANDARD



P.A.M. Dirac

1928, Dirac écrit:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

ca contient toutes les **propriétés de l'électron**

(en fait ca décrit tout fermion !)

lepton, quark

MAIS l'équation de Dirac possède aussi des solutions à **“énergie négative”**

PREMIERS PAS DU MODÈLE STANDARD



P.A.M. Dirac

1928, Dirac écrit:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

ca contient toutes les **propriétés de l'électron**

(en fait ca décrit tout fermion !)

lepton, quark

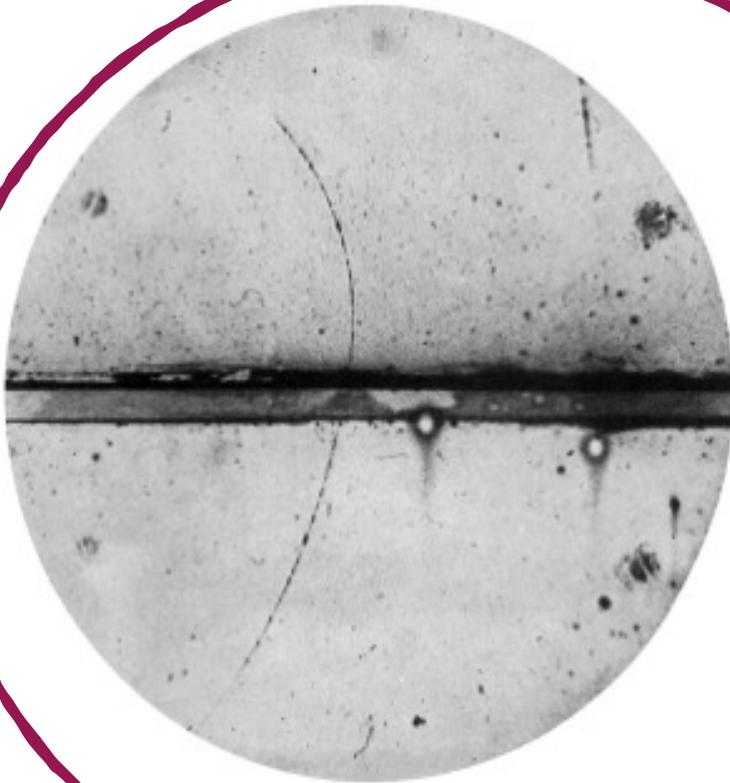
MAIS l'équation de Dirac possède aussi des solutions à **“énergie négative”**

→ en 1931 Dirac théorise l'existence du positron !!

énergie négative = particules identiques à l'électron, mais de charge opposée

well done !

LA DÉCOUVERTE DU POSITRON (1932)



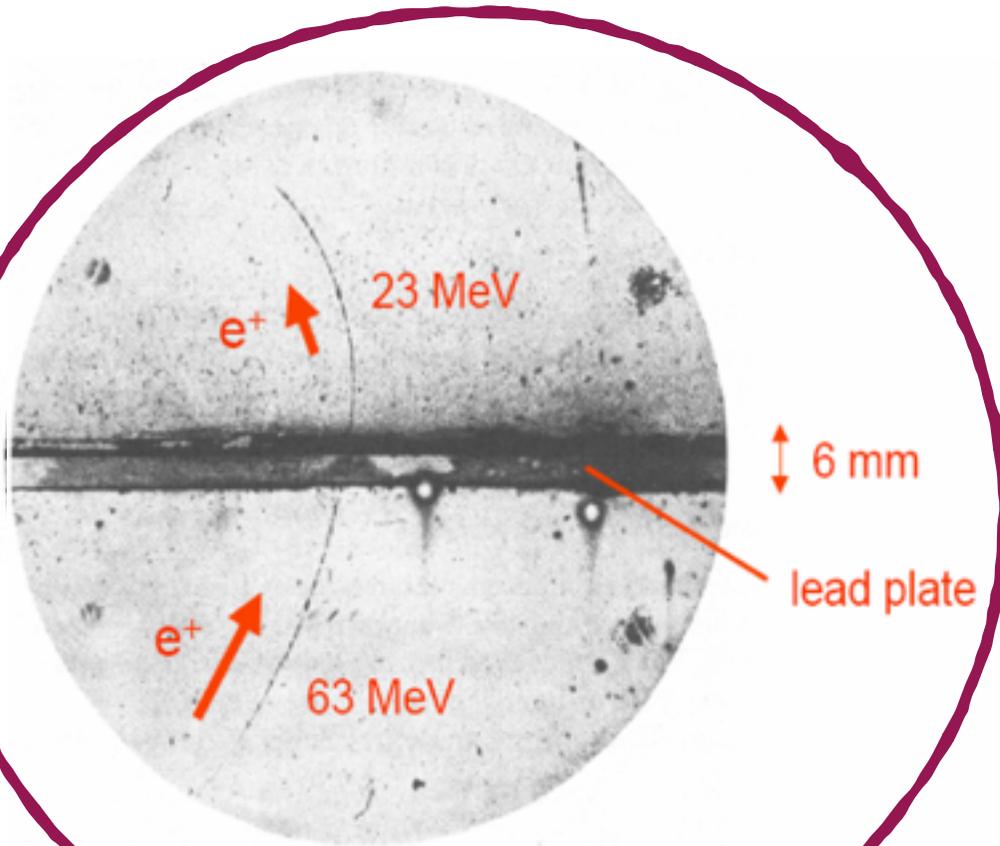
Anderson, Millikan

- ★ Source → rayons cosmiques
- ★ Détecteur → chambre à brouillard
- ★ Champs magnétique → mesure de l'impulsion (et charge!) de la particule

Chambre à brouillard: comment en construire une? regarder la: [LINK](#)

well done !

LA DÉCOUVERTE DU POSITRON (1932)



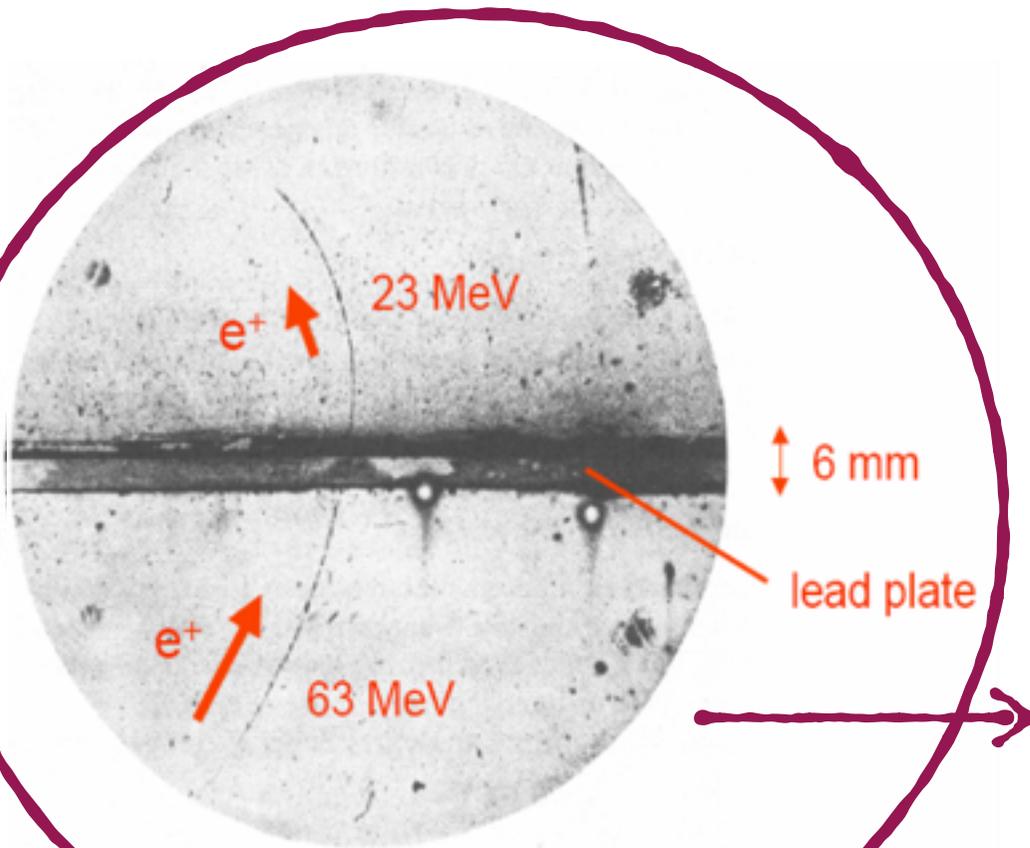
Anderson, Millikan

- ★ Source → rayons cosmiques
- ★ Détecteur → chambre à brouillard
- ★ Champs magnétique → mesure de l'impulsion (et charge!) de la particule

Chambre à brouillard: comment en construire une? regarder la: [LINK](#)

well done !

LA DÉCOUVERTE DU POSITRON (1932)



Anderson, Millikan

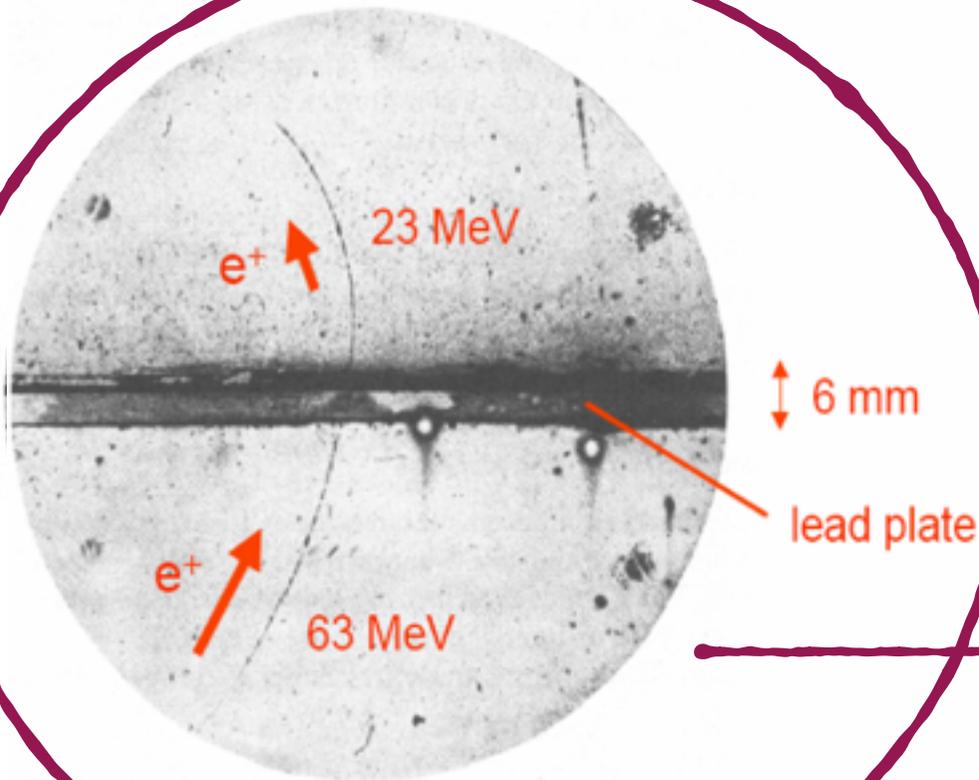
- ★ Source → rayons cosmiques
- ★ Détecteur → chambre à brouillard
- ★ Champs magnétique → mesure de l'impulsion (et charge!) de la particule
- particule de charge +
- plus légère qu'un proton

Chambre à brouillard: comment en construire une? regarder la: [LINK](#)

well done!



LA DÉCOUVERTE DU POSITRON (1932)



Anderson, Millikan

Chambre à brouillard: comment en construire une? regarder la: [LINK](#)

- ★ Source → rayons cosmiques
- ★ Détecteur → chambre à brouillard
- ★ Champs magnétique → mesure de l'impulsion (et charge!) de la particule

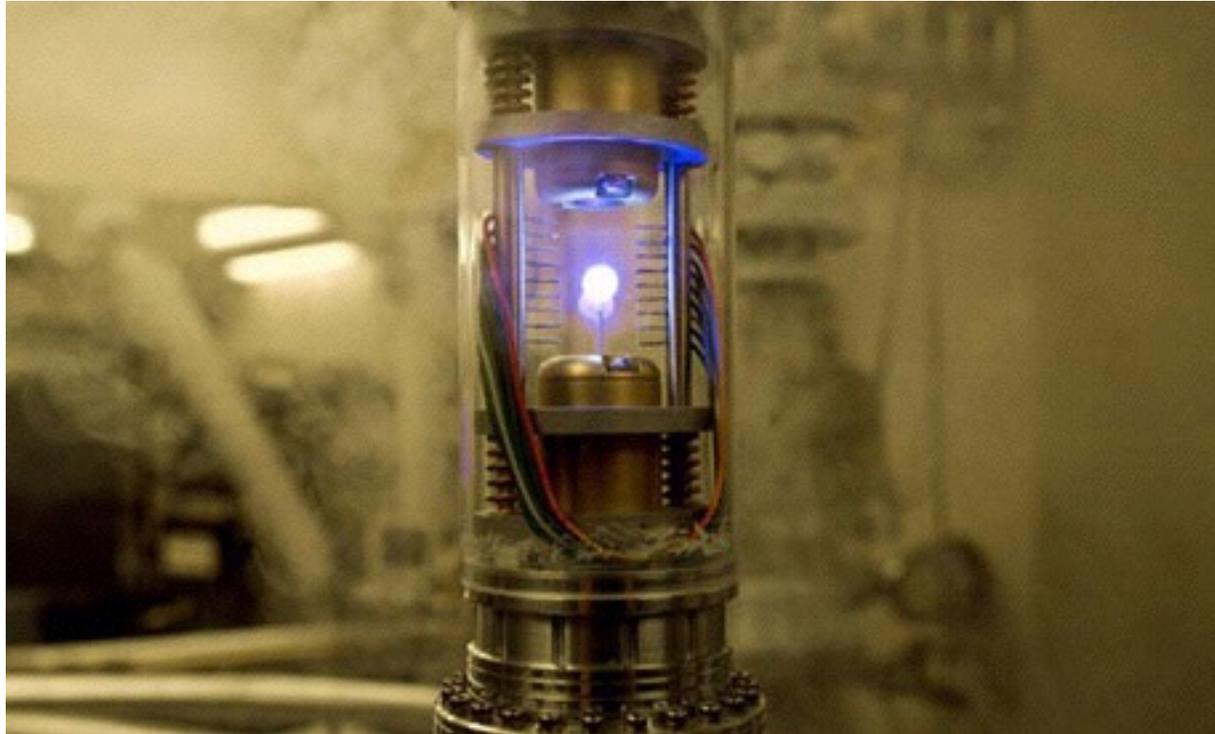
- particule de charge +
- plus légère qu'un proton



c'est le positron !
l'équation de Dirac marche !
→ QED

DONC...L'ANTI-MATIÈRE EXISTE !

on en produit quotidiennement au CERN...



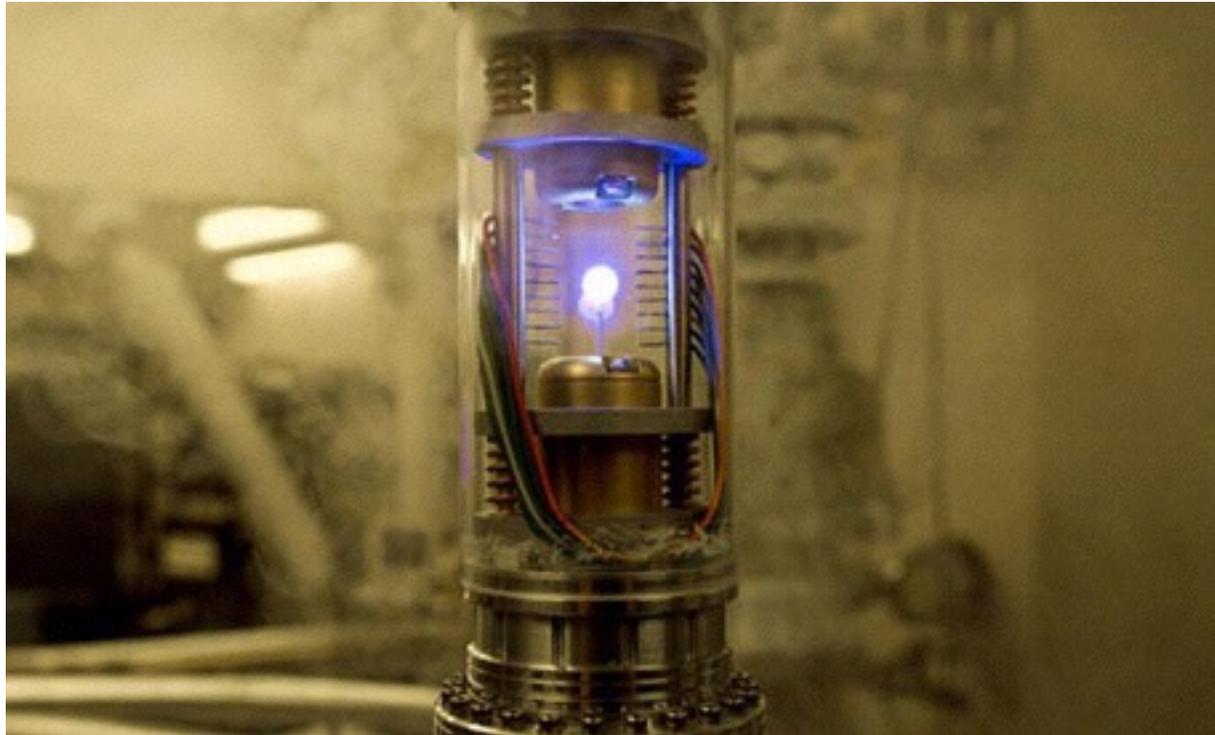
[Anges et Démons, 2009]

**...mais pas autant qu'au cinéma
(en 40 ans on en a produit 10^{-8} g)**

DONC...L'ANTI-MATIÈRE EXISTE !

SINCE 1932

on en produit quotidiennement au CERN...



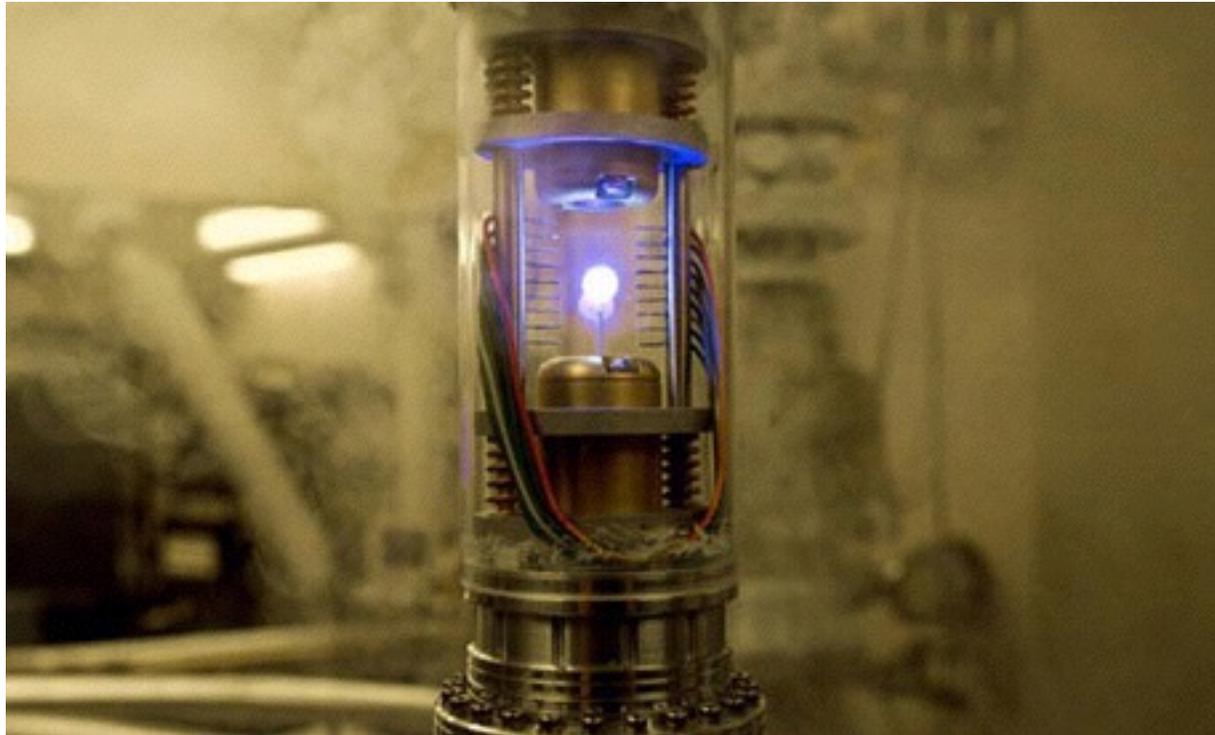
[Anges et Démons, 2009]

...mais pas autant qu'au cinéma
(en 40 ans on en a produit 10^{-8} g)

DONC...L'ANTI-MATIÈRE EXISTE !

SINCE 1932

on en produit quotidiennement au CERN...

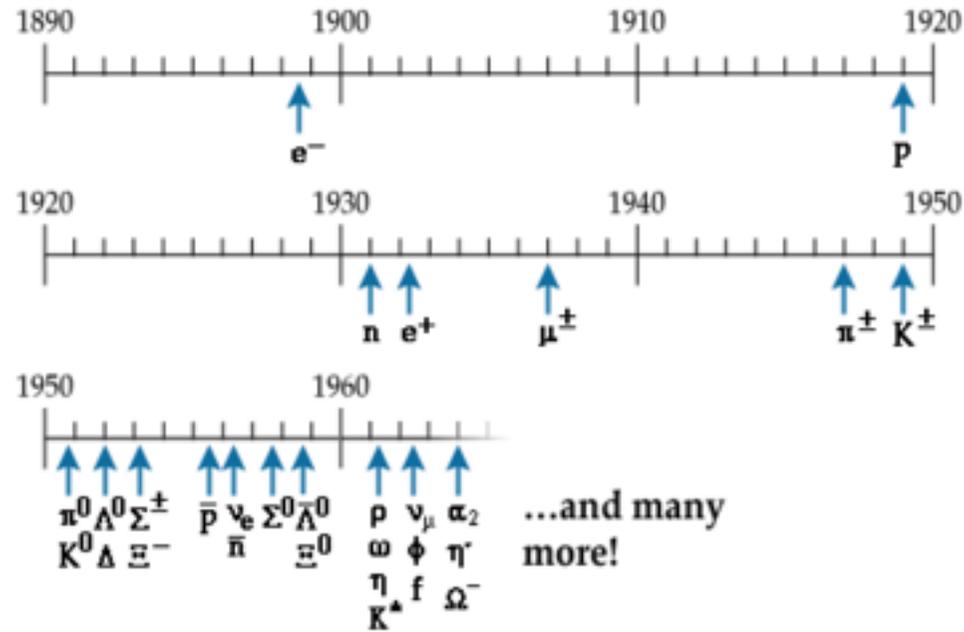


[Anges et Démons, 2009]

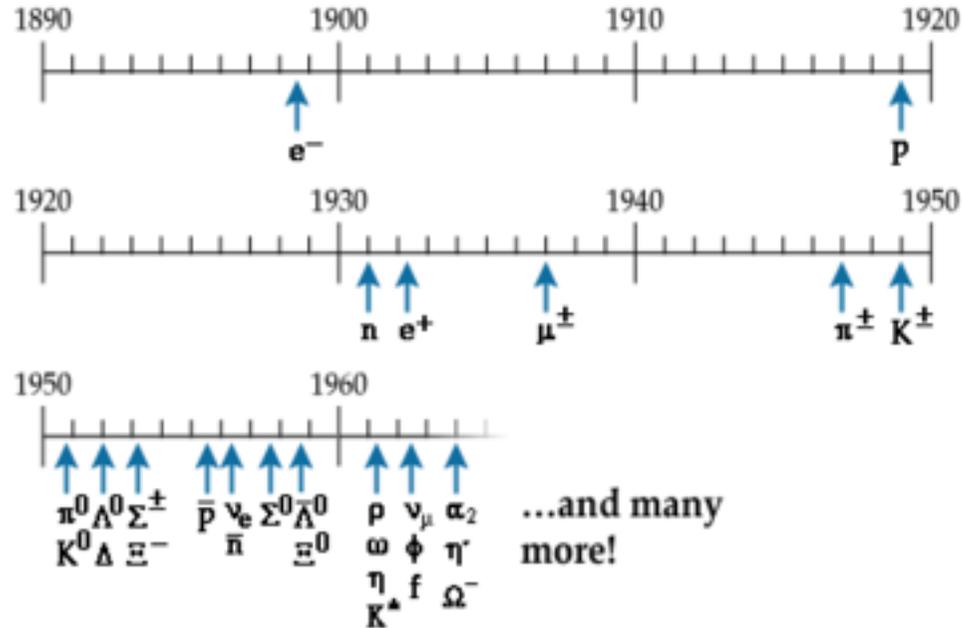
...mais pas autant qu'au cinéma
(en 40 ans on en a produit 10^{-8} g)

très très très
approximatif

LE ZOO DE PARTICULES

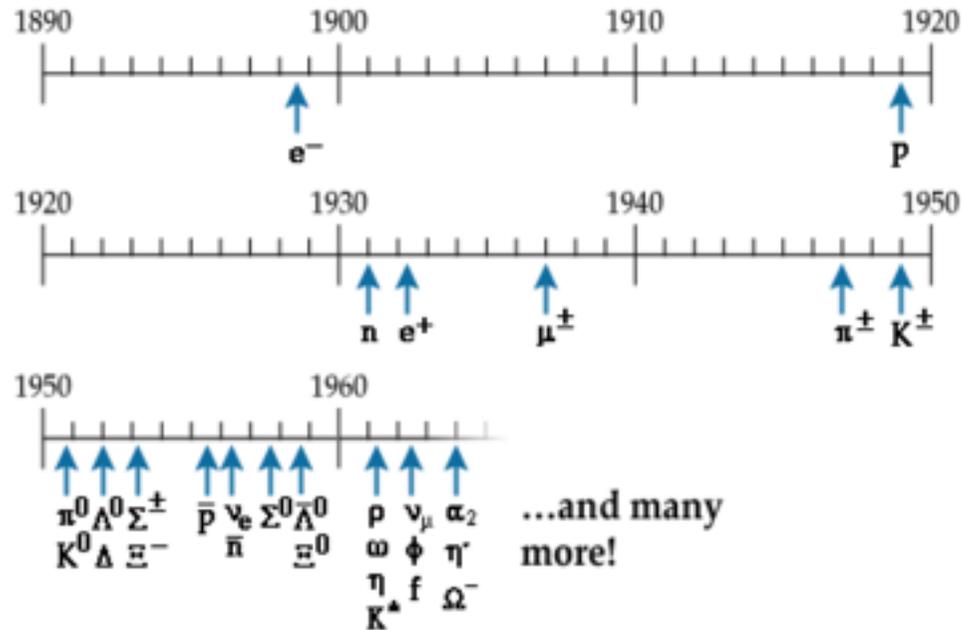


LE ZOO DE PARTICULES



→ nécessité de mettre de l'ordre en cherchant des "régularités"

LE ZOO DE PARTICULES

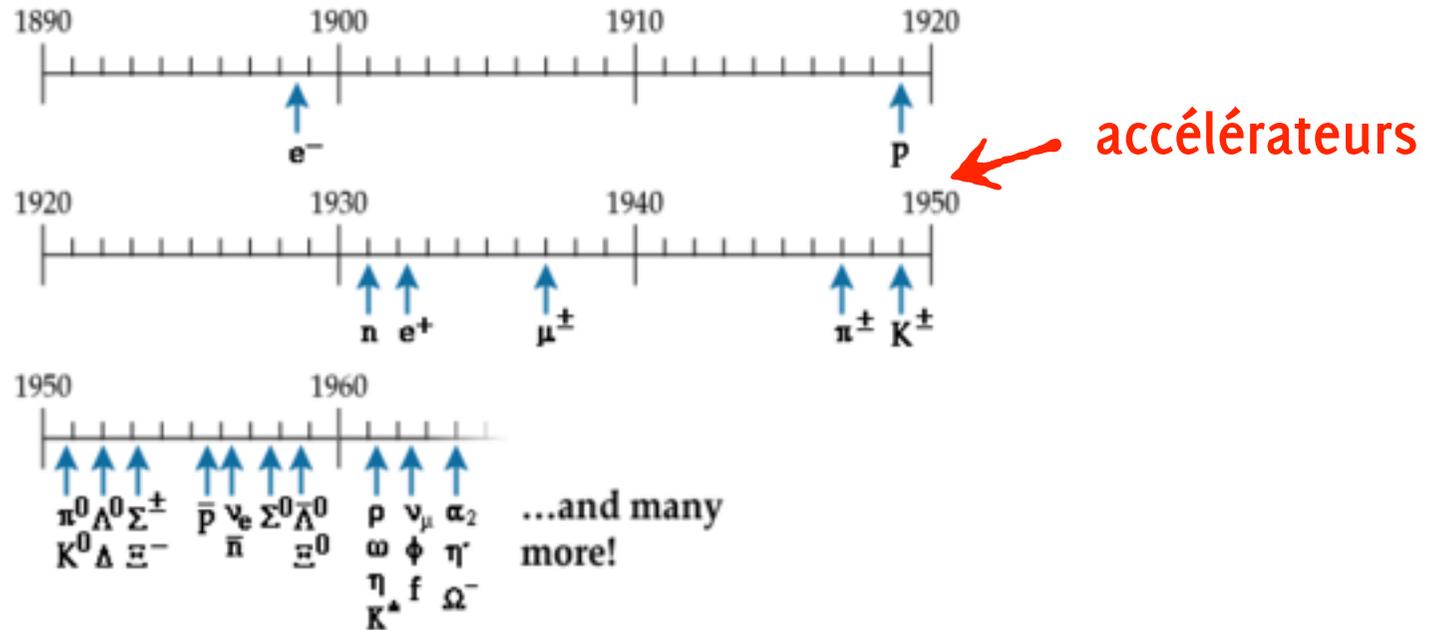


→ nécessité de mettre de l'ordre en cherchant des “régularités”

un peu comme pour la table des éléments de Mendeleev !

mais en les ordonnant par masse, charge, spin, durée de vie, ...

LE ZOO DE PARTICULES



→ nécessité de mettre de l'ordre en cherchant des "régularités"

un peu comme pour la table des éléments de Mendeleev !

mais en les ordonnant par masse, charge, spin, durée de vie, ...

“THE EIGHTFOLD WAY”



M. Gell-Mann

Au début des années '60 Gell-Mann et Ne'eman ordonnent empiriquement ces particules selon leur caractéristiques... **masse, charge, spin, durée de vie, ...**

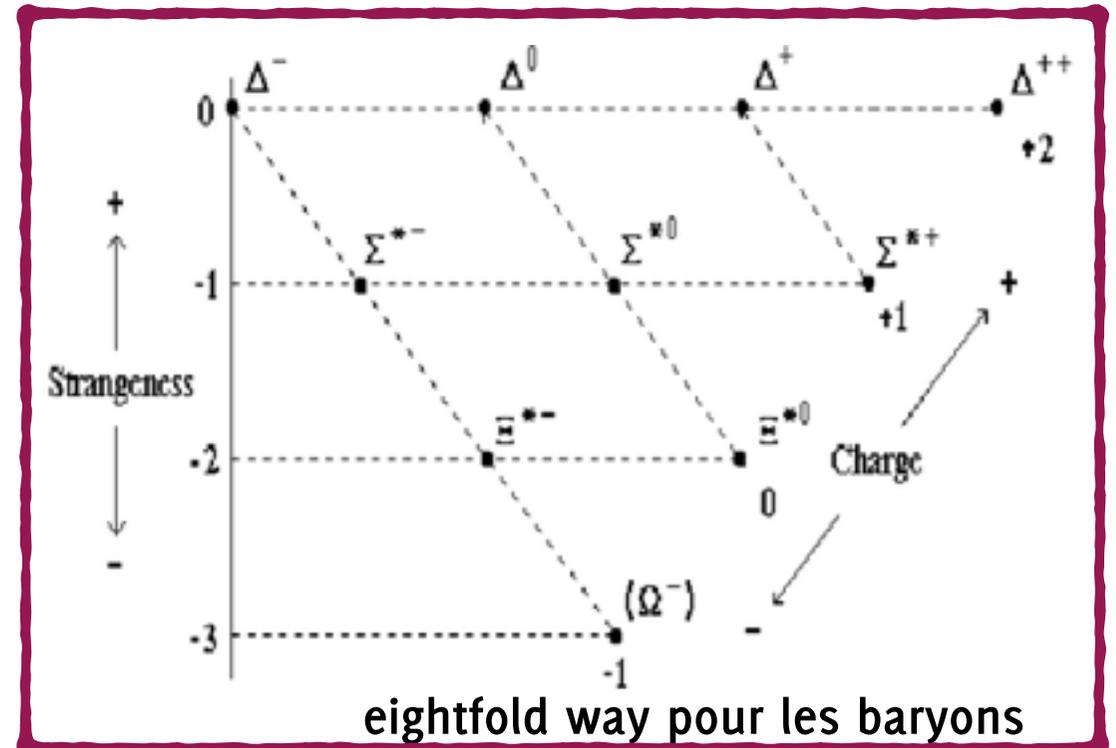
“THE EIGHTFOLD WAY”



M. Gell-Mann

Au début des années '60 Gell-Mann et Ne'eman ordonnent empiriquement ces particules selon leur caractéristiques... **masse, charge, spin, durée de vie, ...**

“la voie des octets” → découverte de l' Ω^-



“THE EIGHTFOLD WAY”



M. Gell-Mann

Au début des années '60 Gell-Mann et Ne'eman ordonnent empiriquement ces particules selon leur caractéristiques...

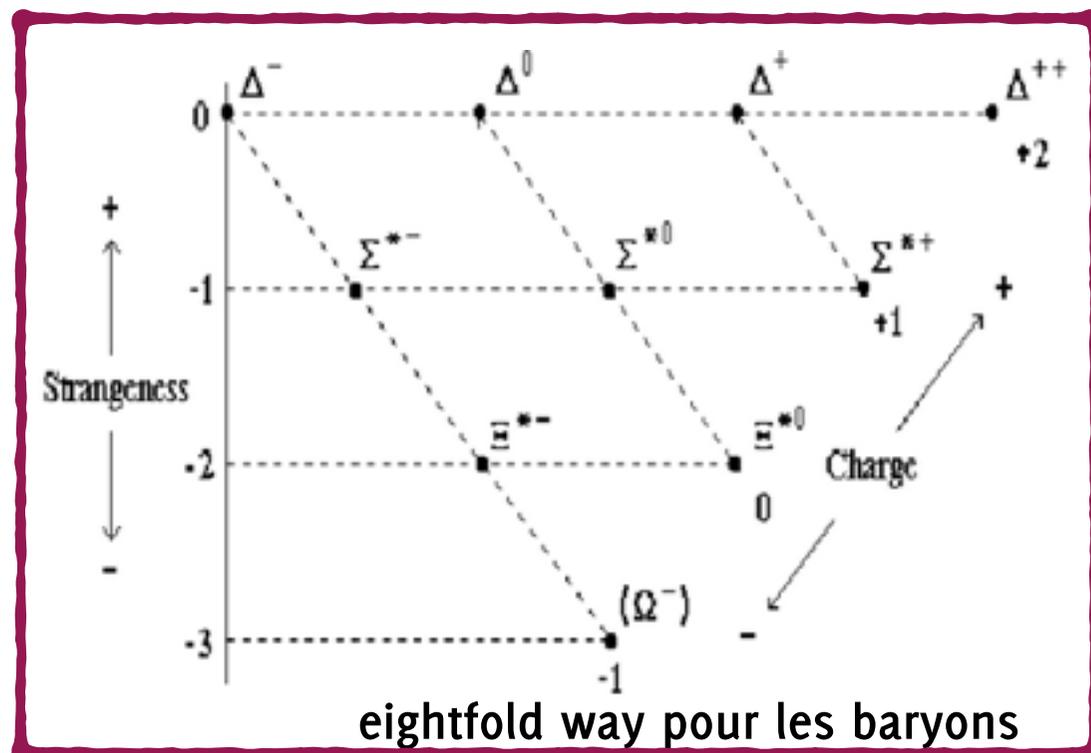
masse, charge, spin, durée de vie, ...

“la voie des octets” → découverte de l' Ω^-

Classification **purement mathématique**

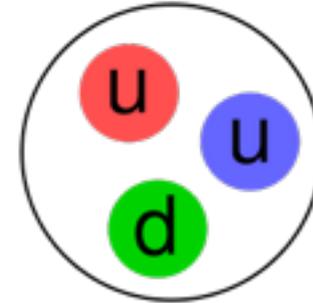
OU

Liée à la **structure des hadrons?**

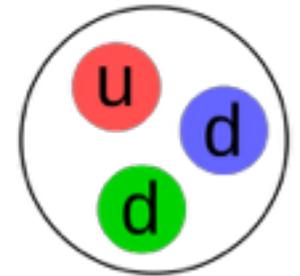


LA DÉCOUVERTE DES QUARKS

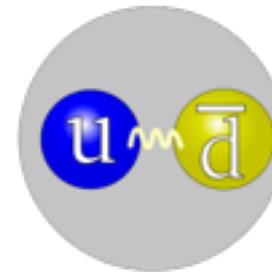
Gell-Mann et Zweig décrivent **toutes ces particules** avec seulement **3+3** particules hypothétiques: les quarks up, down, strange et leurs anti-particules



proton



neutron

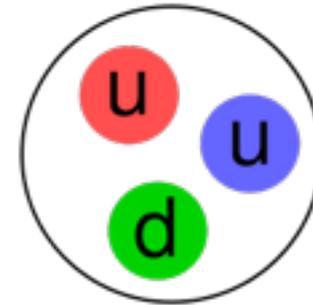


π^+

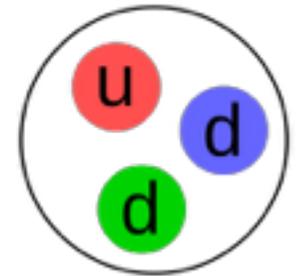
LA DÉCOUVERTE DES QUARKS

Gell-Mann et Zweig décrivent **toutes ces particules** avec seulement **3+3** particules hypothétiques: les quarks up, down, strange et leurs anti-particules

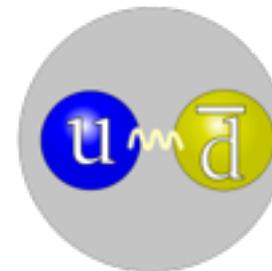
Première preuve expérimentale que le proton n'est pas une particule élémentaire → 1968 "deep inelastic scattering" à SLAC



proton



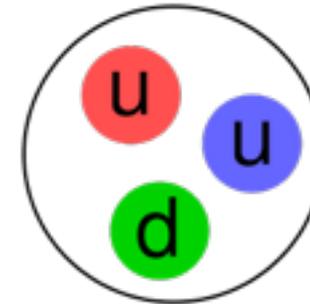
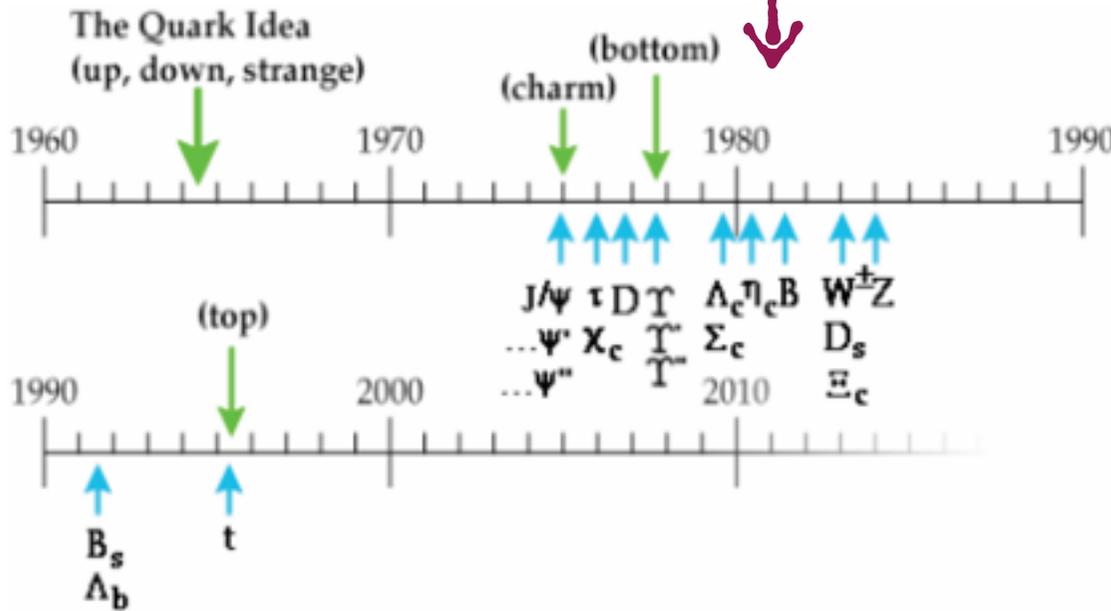
neutron



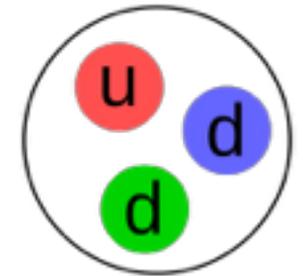
π^+

LA DÉCOUVERTE DES QUARKS

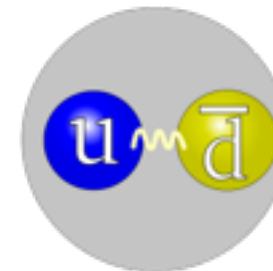
Gell-Mann et Zweig décrivent **toutes ces particules** avec seulement **3+3** particules hypothétiques: les quarks up, down, strange et leurs anti-particules



proton



neutron



π^+

L'ÉPOPÉE DE L'UNIFICATION ÉLECTRO-FAIBLE

électro-dynamique quantique théorie de Fermi de l'interaction faible

L'ÉPOPÉE DE L'UNIFICATION ÉLECTRO-FAIBLE

électro-dynamique quantique



théorie de Fermi de l'interaction faible



1957: idée de l'unification électro-faible (Schwinger)

L'ÉPOPÉE DE L'UNIFICATION ÉLECTRO-FAIBLE

électro-dynamique quantique



théorie de Fermi de l'interaction faible



1957: idée de l'unification électro-faible (**Schwinger**)

1961: théorie de jauge de l'interaction électro-faible (**Glashow**)

→ 3 bosons porteurs de l'interaction: γ , W, Z

→ problème: masses de W et Z mises 'à la main'

L'ÉPOPÉE DE L'UNIFICATION ÉLECTRO-FAIBLE

électro-dynamique quantique



théorie de Fermi de l'interaction faible



1957: idée de l'unification électro-faible (Schwinger)

1961: théorie de jauge de l'interaction électro-faible (Glashow)

- 3 bosons porteurs de l'interaction: γ , W, Z pas observés
- problème: masses de W et Z mises 'à la main' (à l'époque)

L'ÉPOPÉE DE L'UNIFICATION ÉLECTRO-FAIBLE

électro-dynamique quantique

théorie de Fermi de l'interaction faible



1957: idée de l'unification électro-faible (Schwinger)

1961: théorie de jauge de l'interaction électro-faible (Glashow)

→ 3 bosons porteurs de l'interaction: γ , W, Z pas observés

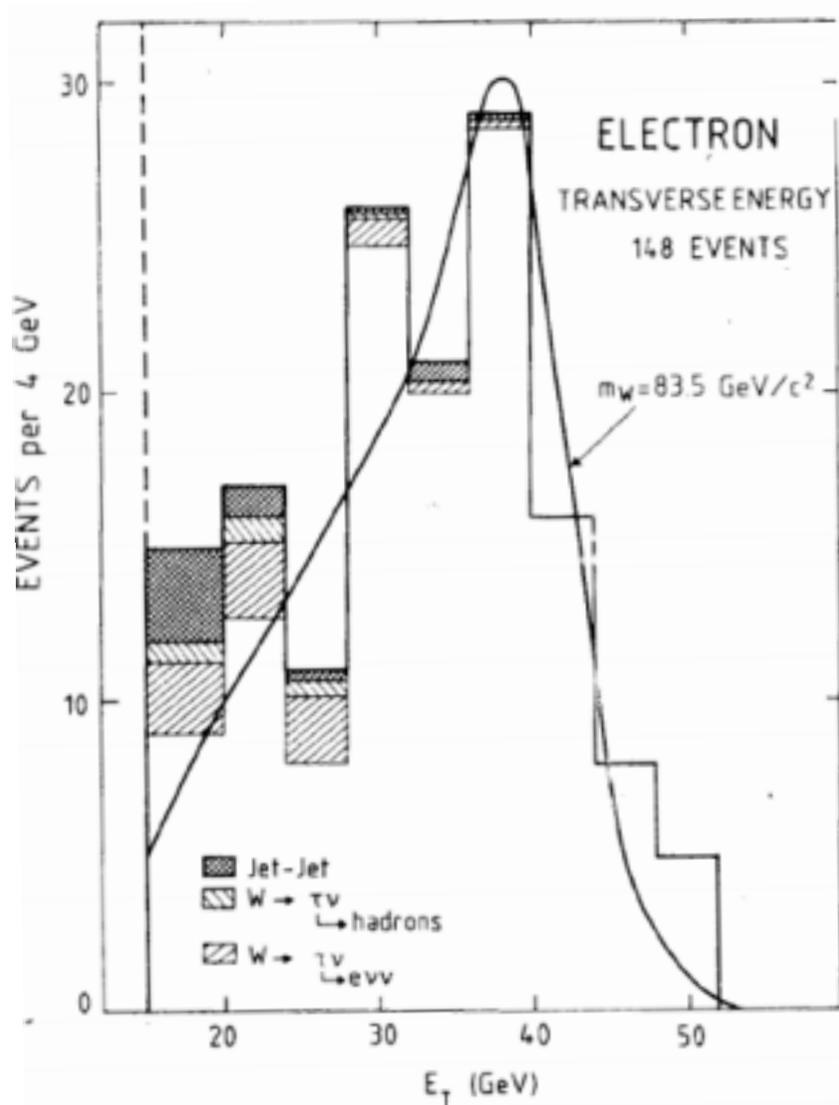
→ problème: masses de W et Z mises 'à la main' (à l'époque)

1967: introduction du champs de Higgs-Brout-Englert

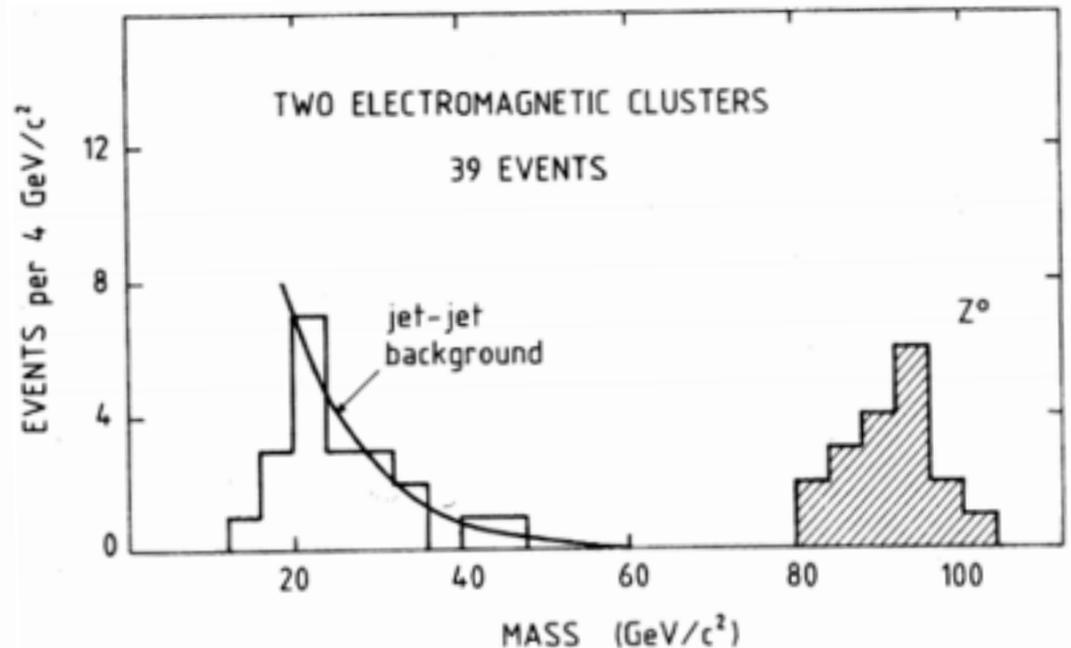
→ théorie mathématiquement 'solide'

→ prediction d'une particule de plus (le boson de Higgs)

LA DÉCOUVERTE DU W ET DU Z



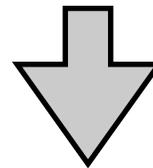
- ★ Expériences UA1 et UA2 au collisionneur $Sp\bar{p}S$ du CERN
- ★ 1983 observation du W, suivie rapidement par l'observation du Z



LE PROBLÈME DE LA MASSE DES PARTICULES

Les symétries constitutives du Modèle Standard ne prévoient pas de masse pour les bosons et fermions

pourtant...

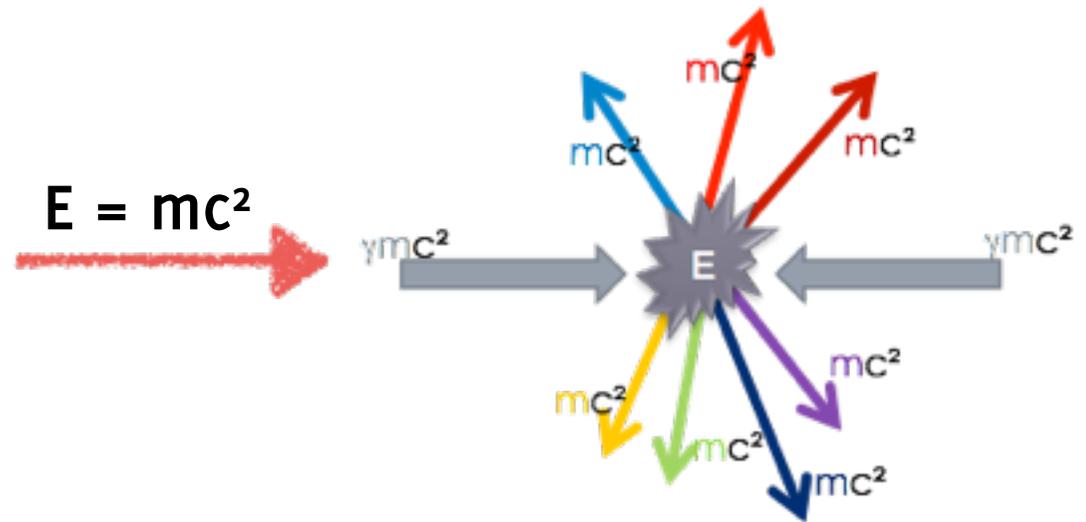
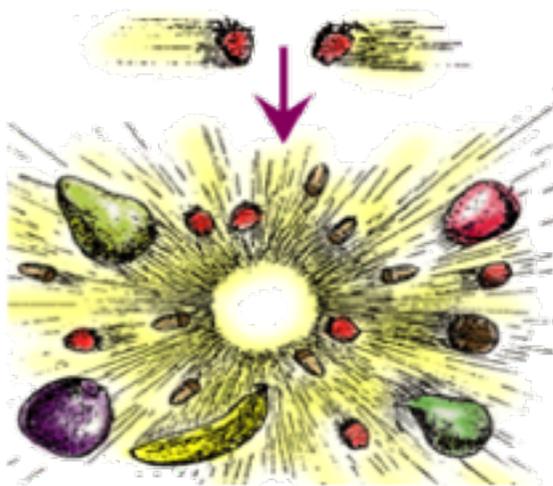


Il faut un mécanisme qui génère dynamiquement la masse de toutes les particules tout en conservant l'invariance de jauge

le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

LE MODÈLE STANDARD ET LES ACCÉLÉRATEURS

- 🔍 Pour découvrir de nouvelles particules ou tester les prédictions théoriques on utilise les **accélérateurs de particules**

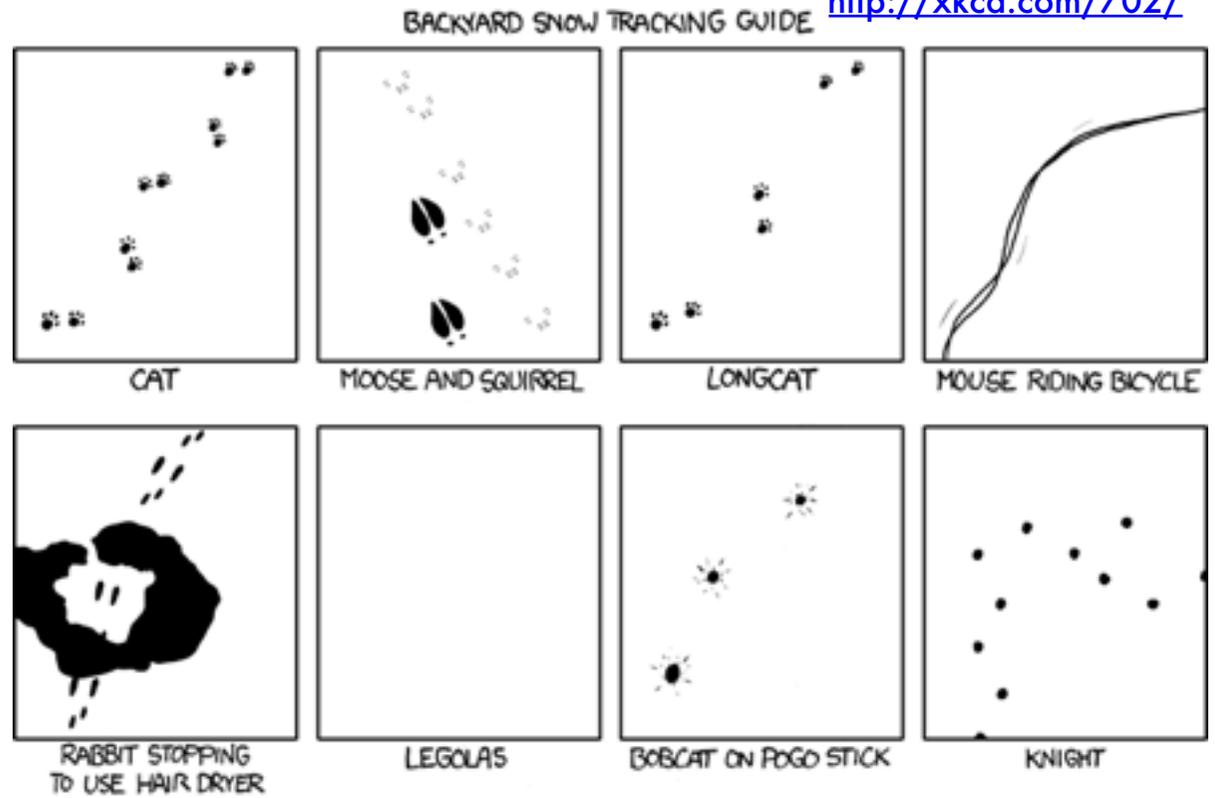


- 🔍 Au LHC on a 10^{11} protons interagissant avec 10^{11} protons
- 🔍 Un événement $\sim 1\text{MB}$, une année de prise de données $\sim 10^7\text{MB}$
→ 100 millions de dictionnaires de 65000 mots...et il faut les classer !

DÉTECTION DES PARTICULES: LE PRINCIPE

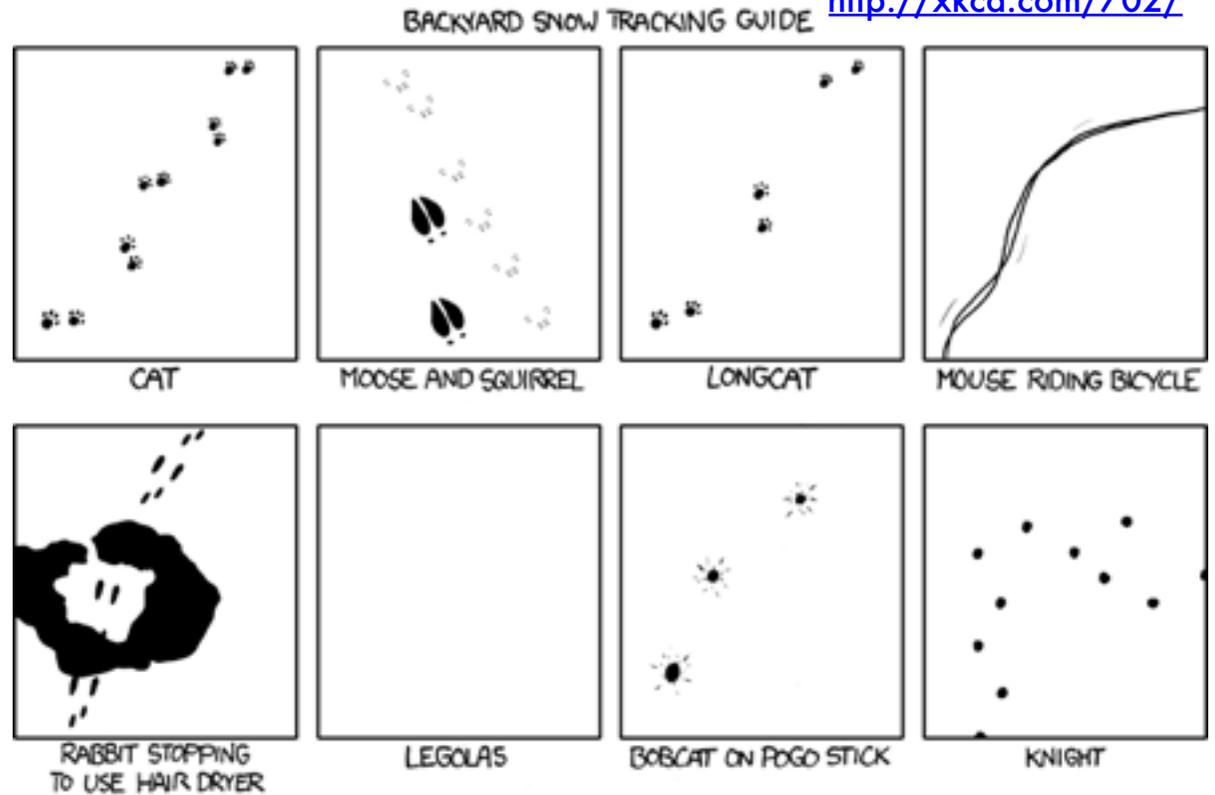
DÉTECTION DES PARTICULES: LE PRINCIPE

on ne voit que leur traces..



DÉTECTION DES PARTICULES: LE PRINCIPE

on ne voit que leur traces..



...laissées dans des détecteurs colossaux
→ ATLAS: 44m de long, 22m de haut, 7000 tonnes !



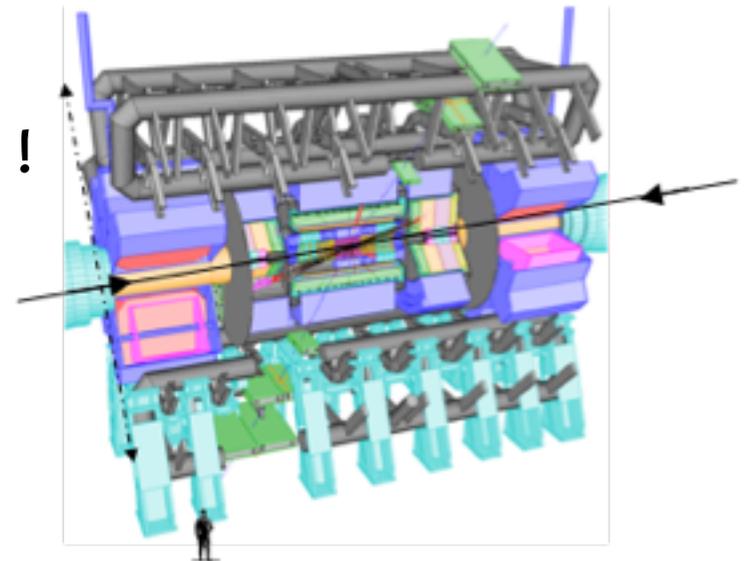
~ 2 cm



~ 10 cm



~ 50 cm

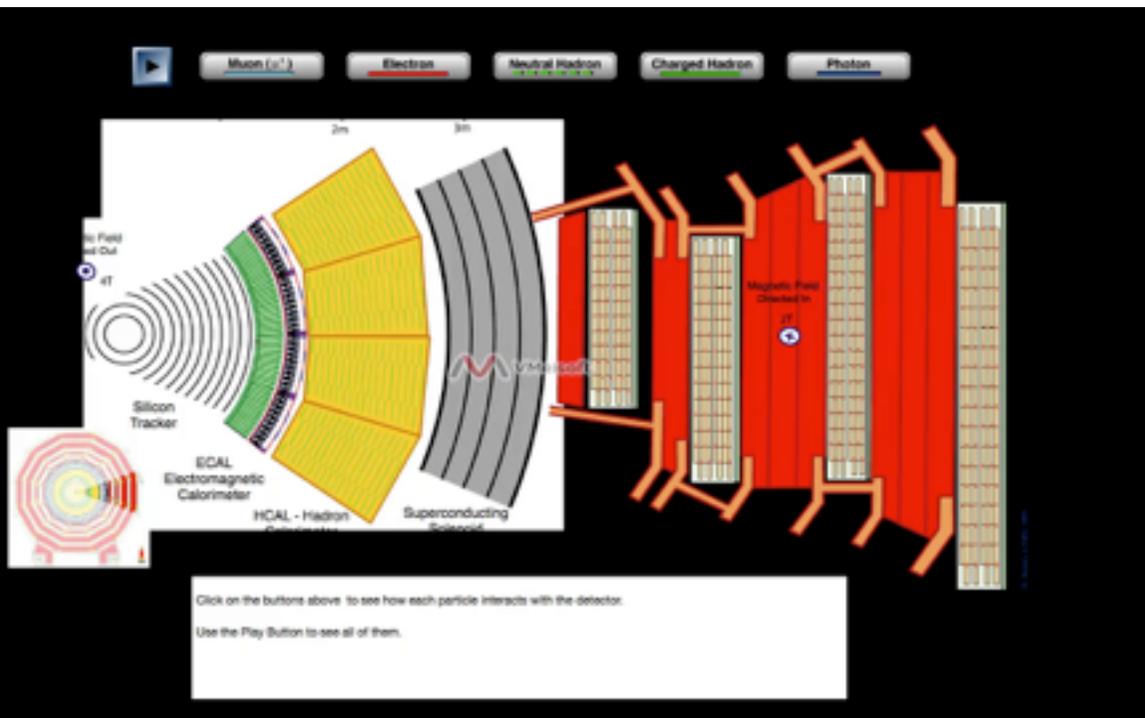


~ 4000 cm



DÉTECTION DES PARTICULES: EN VRAI

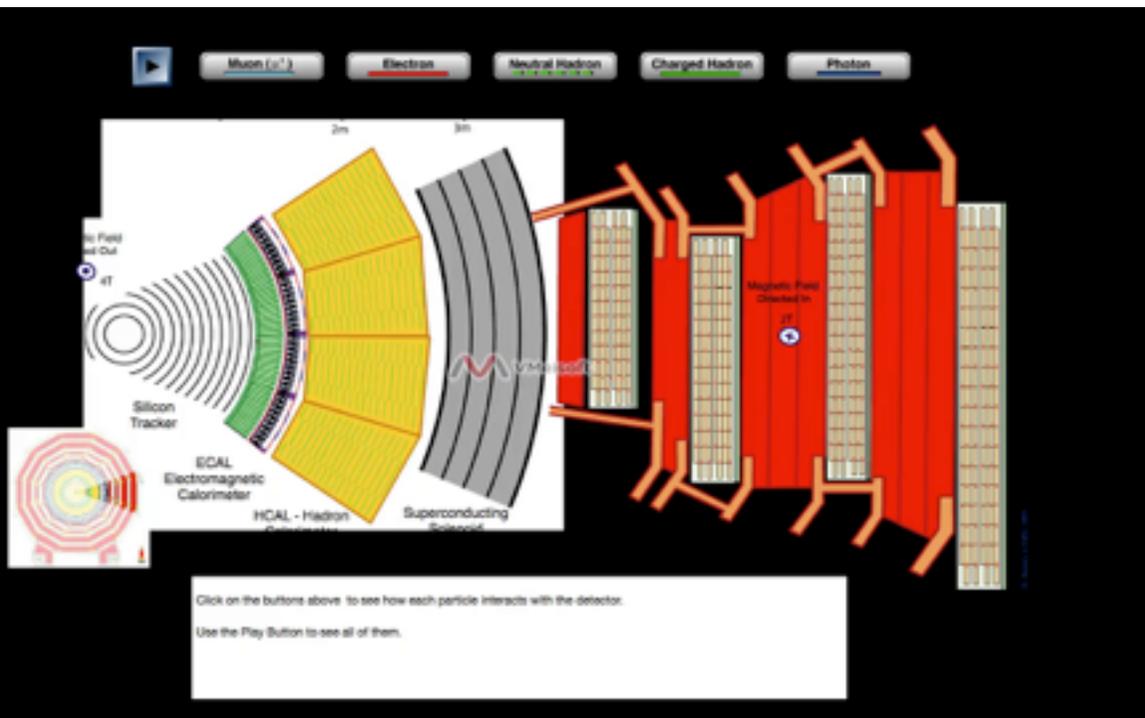
- ▶ Trajectographe → traces en 3D
- ▶ Champ magnétique pour courber les particules chargées
- ▶ Mesures du rayon de courbure → impulsion
- ▶ Calorimétrie pour mesurer l'énergie d'une particule



DÉTECTION DES PARTICULES: EN VRAI

- ▶ Trajectographe → traces en 3D
- ▶ Champ magnétique pour courber les particules chargées
- ▶ Mesures du rayon de courbure → impulsion
- ▶ Calorimétrie pour mesurer l'énergie d'une particule

reconnaitre les événements intéressants n'est pas banal !



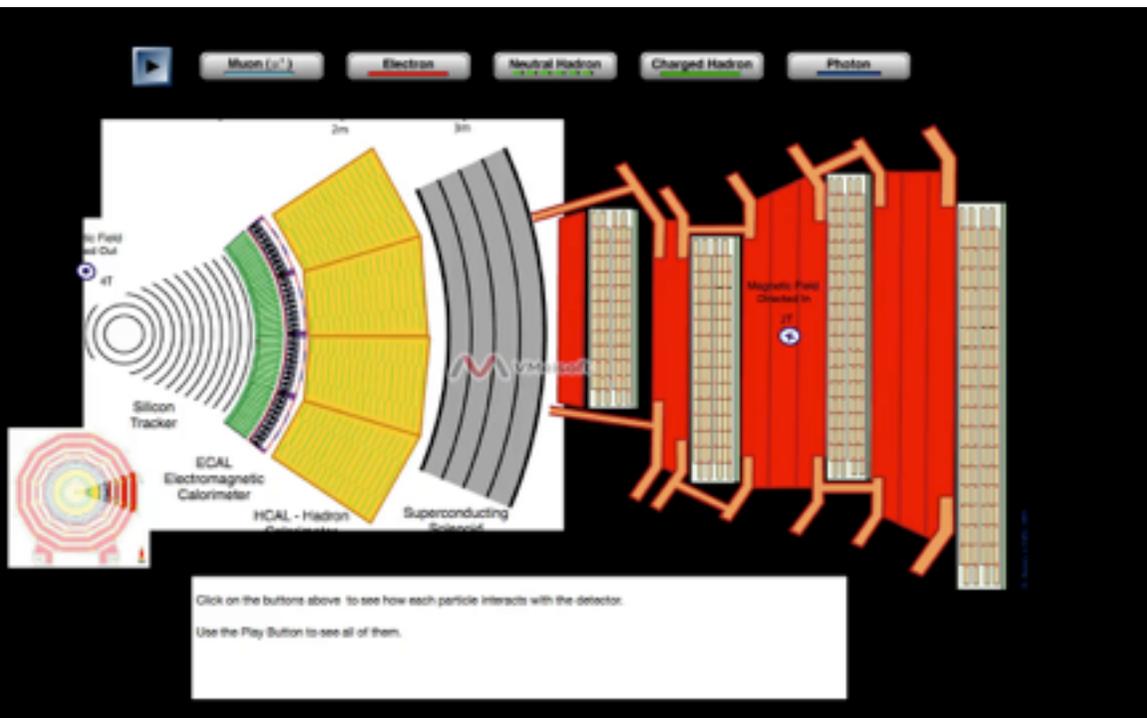
Moisson de données informatiques au LHC ELison Bernet

DÉTECTION DES PARTICULES: EN VRAI

- ▶ Trajectographe → traces en 3D
- ▶ Champ magnétique pour courber les particules chargées
- ▶ Mesures du rayon de courbure → impulsion
- ▶ Calorimétrie pour mesurer l'énergie d'une particule

reconnaitre les événements intéressants n'est pas banal !

On produit un boson de Higgs chaque 1 milliard d'événements !



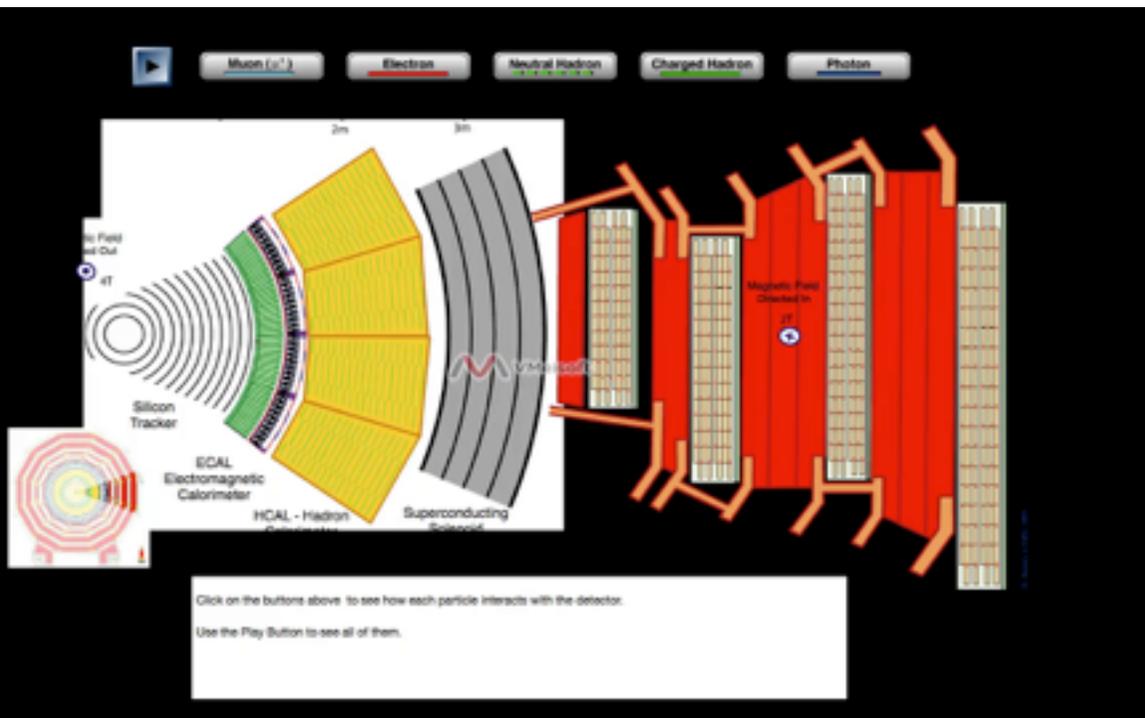
Moisson de données informatiques au LHC ELison Bernet

DÉTECTION DES PARTICULES: EN VRAI

- ▶ Trajectographe → traces en 3D
- ▶ Champ magnétique pour courber les particules chargées
- ▶ Mesures du rayon de courbure → impulsion
- ▶ Calorimétrie pour mesurer l'énergie d'une particule

reconnaitre les événements intéressants n'est pas banal !

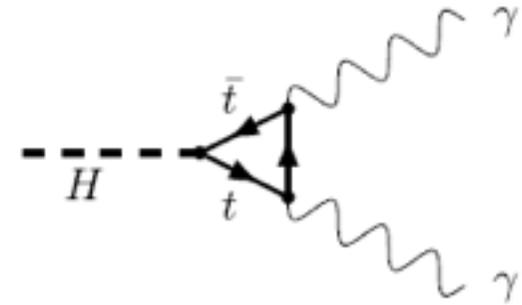
On produit un boson de Higgs chaque 1 milliard d'événements !



Moisson de données informatiques au LHC ©Lison Bernet

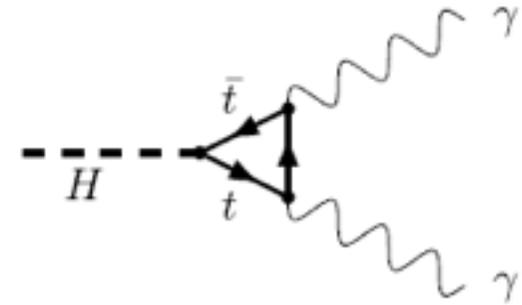
RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (1)

- ★ On choisit le **signal** qu'on recherche
 - Ex: les événements qui contiennent 2 photons



RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (1)

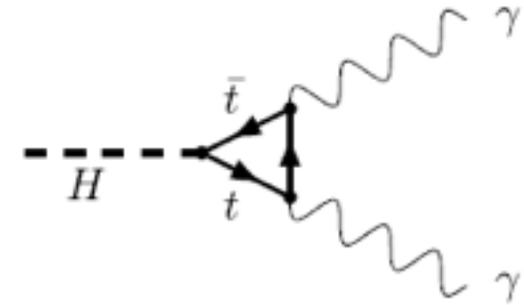
- ★ On choisit le **signal** qu'on recherche
 - Ex: les événements qui contiennent 2 photons



- ★ On développe une stratégie pour séparer le signal du bruit-de-fond
 - bruit-de-fond: ce qui pourrait produire des “traces” dans le détecteur identiques ou similaires à celles laissées par du signal
 - Ex: γ vs π

RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (1)

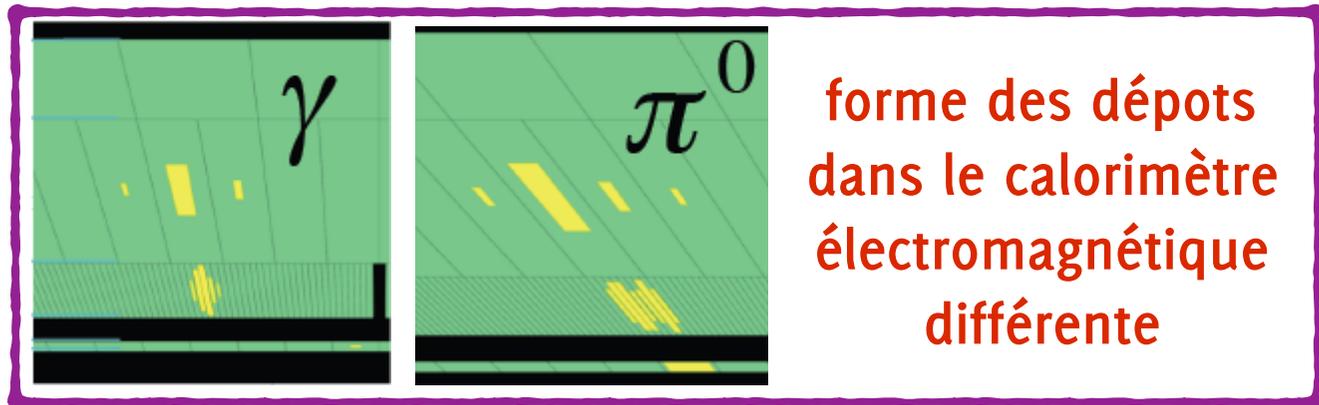
- ★ On choisit le **signal** qu'on recherche
 - Ex: les événements qui contiennent 2 photons



- ★ On développe une stratégie pour séparer le signal du bruit-de-fond
 - bruit-de-fond: ce qui pourrait produire des “traces” dans le détecteur identiques ou similaires à celles laissées par du signal

▸ Ex: γ vs π

en sachant que
 $\pi \rightarrow \gamma\gamma$



forme des dépôts
dans le calorimètre
électromagnétique
différente

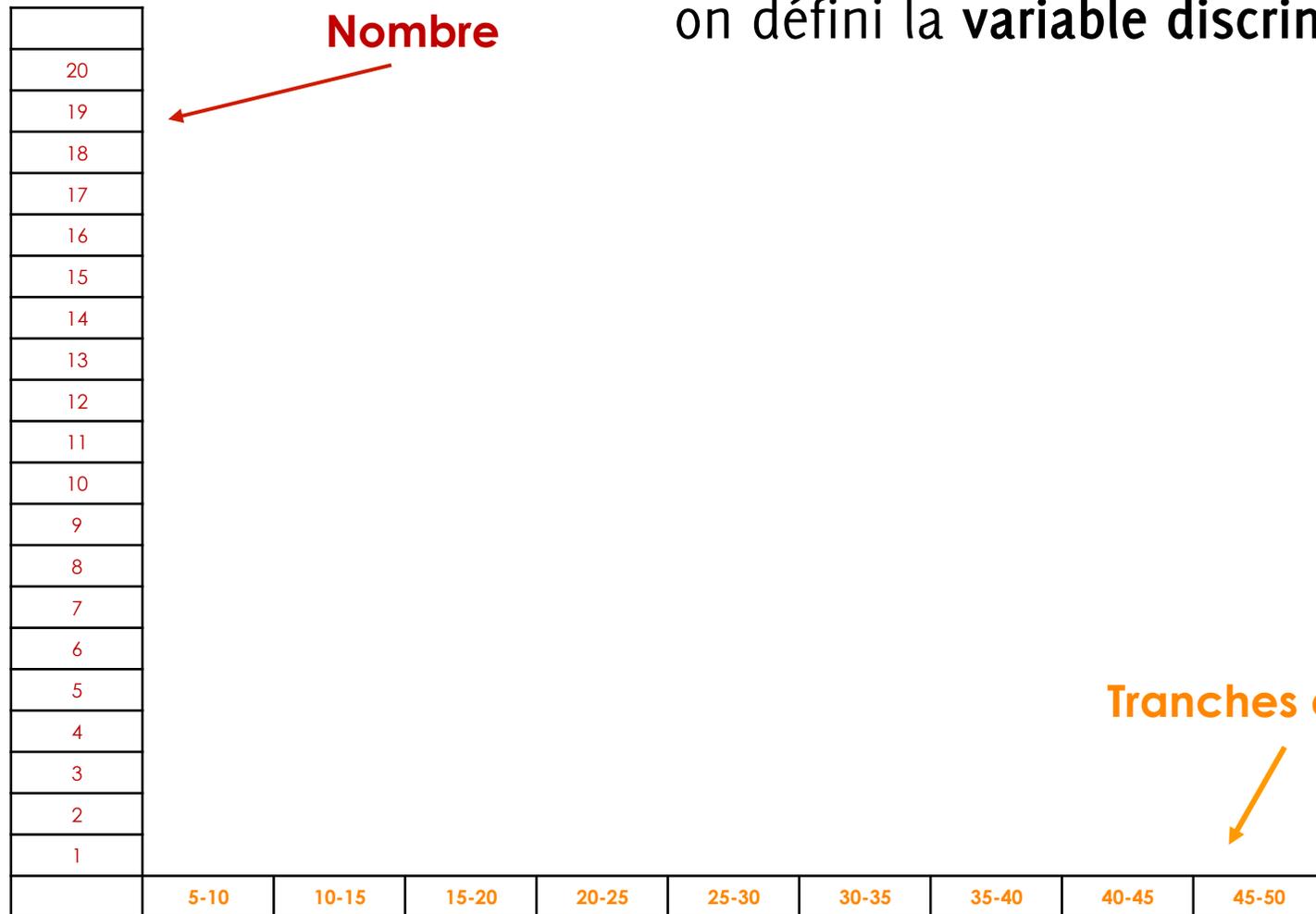
L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

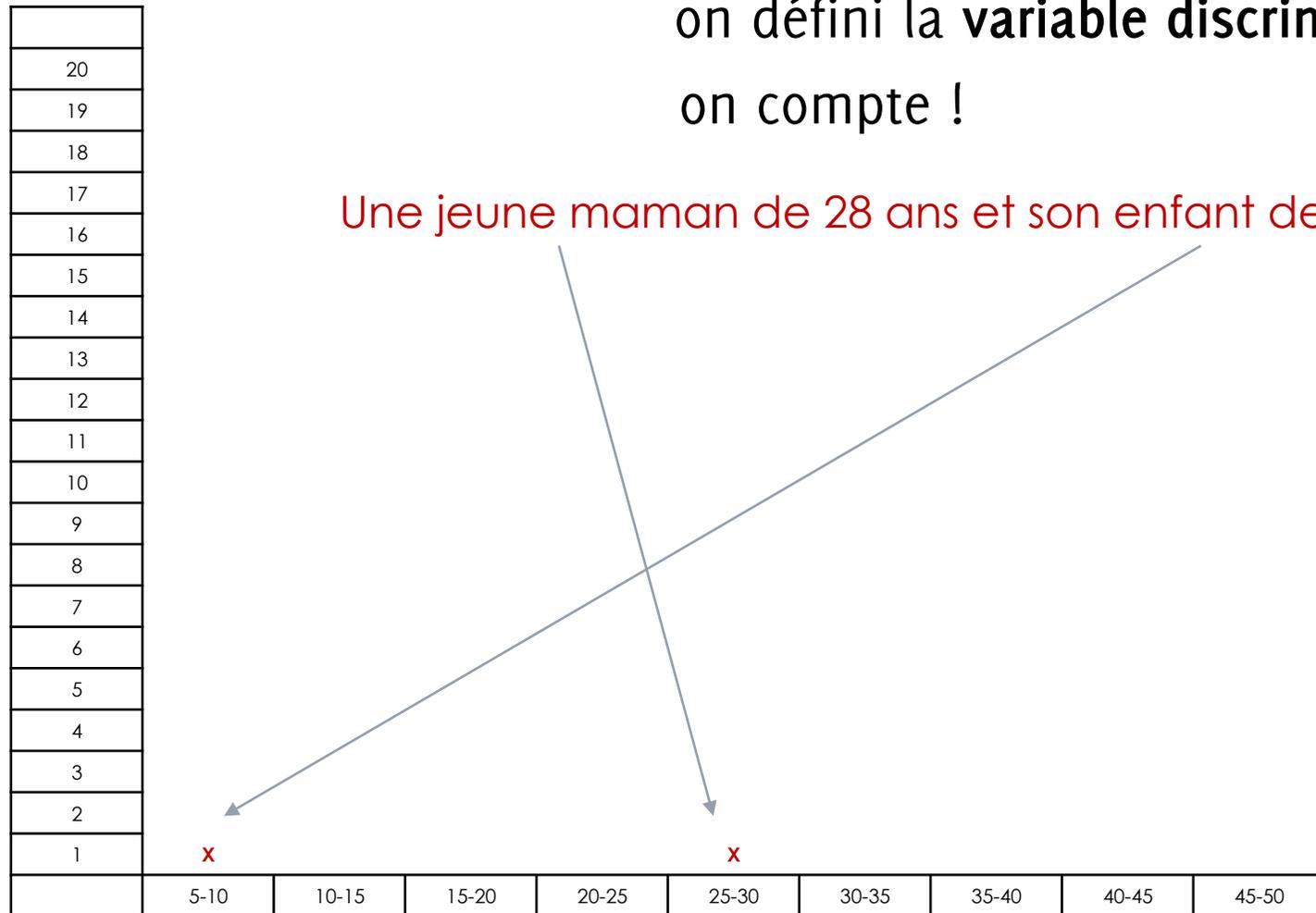
on définit la **variable discriminante**



L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

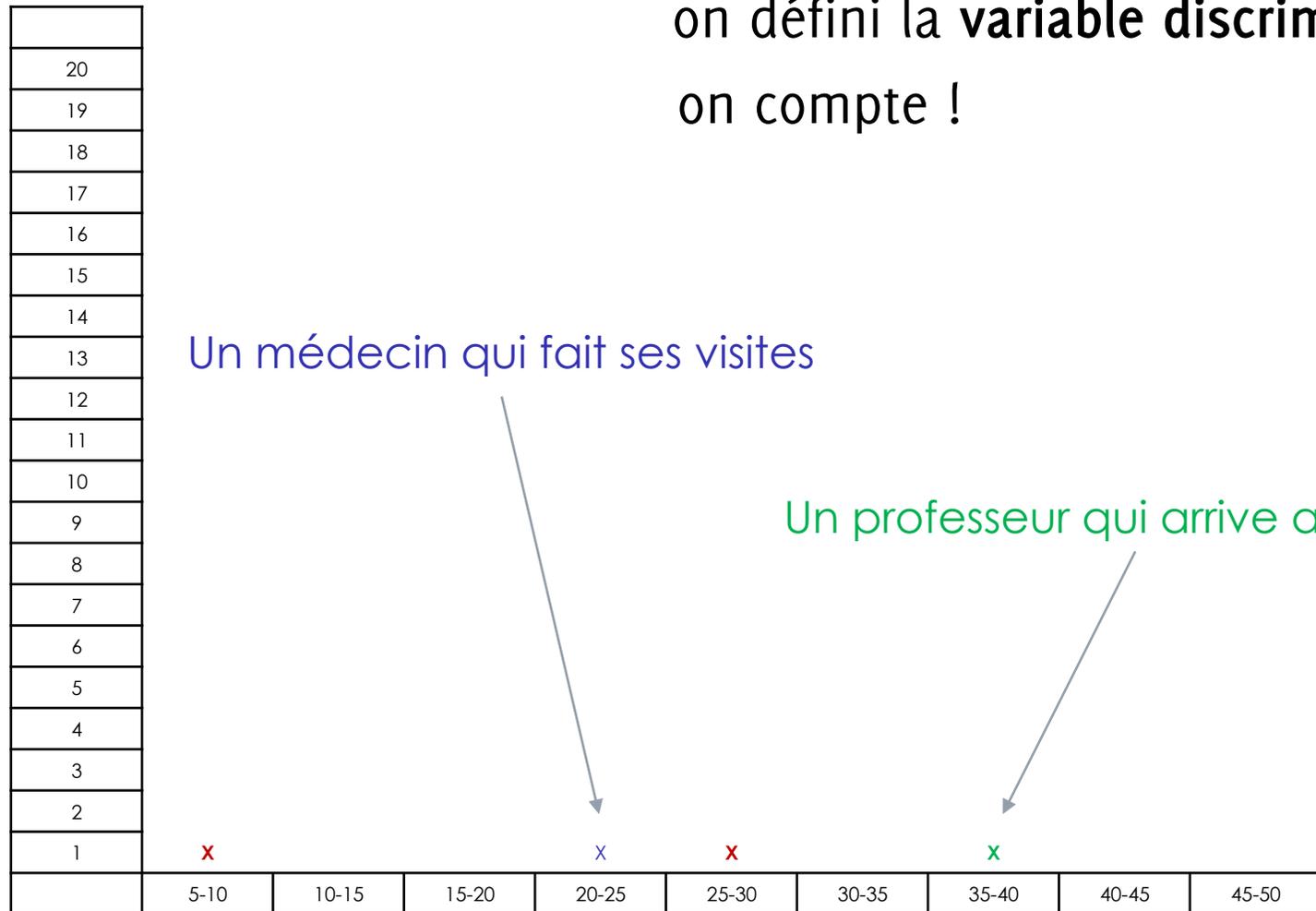
on définit la **variable discriminante**
on compte !



L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

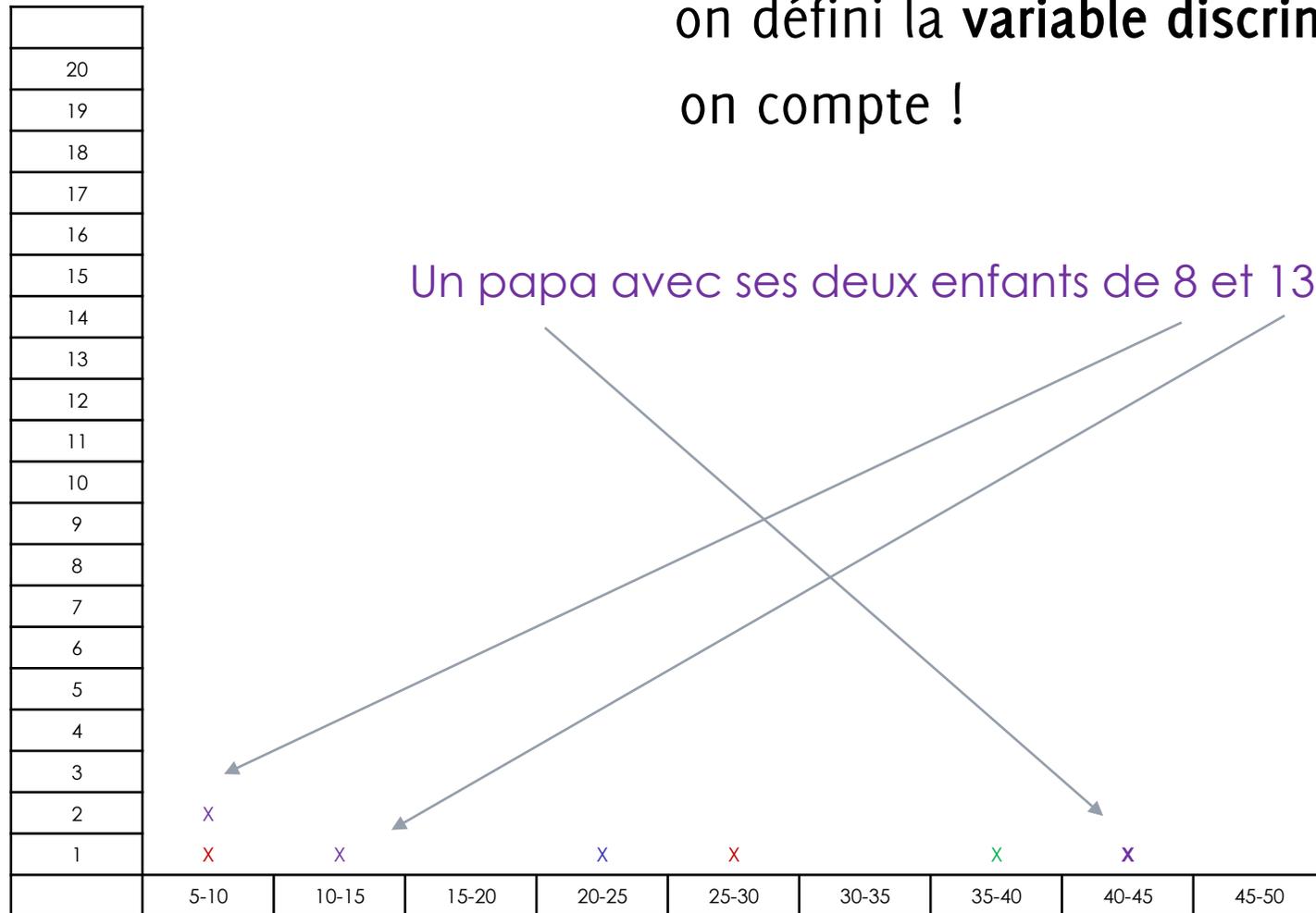
on définit la **variable discriminante**
on compte !



L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !



Un papa avec ses deux enfants de 8 et 13 ans

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X								
1	X	X	X	X	X		X	X	
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X								
1	X	X	X	X	X		X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X								
1	X	X	X	X	X		X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X	X							
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X	X			X				
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4		X							
3		X							
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4		X							
3		X				X			
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5		X							
4		X							
3		X				X			
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6		X							
5		X							
4		X							
3		X				X			
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X				X			
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X				X			
2	X	X	X		X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8		X							
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X				X			
2	X	X	X		X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8		X							
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X	X			X			
2	X	X	X		X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

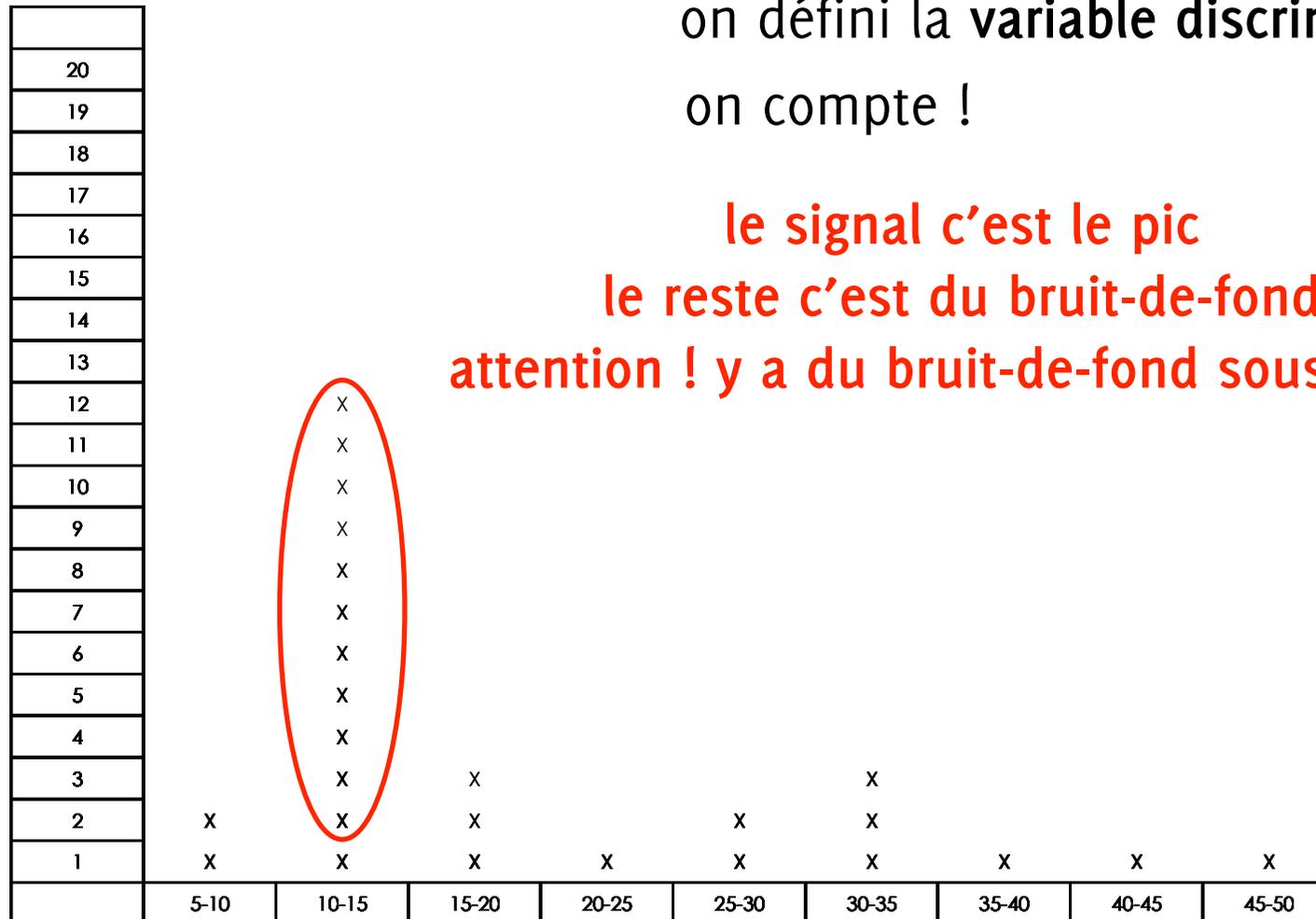
20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12		X							
11		X							
10		X							
9		X							
8		X							
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X	X			X			
2	X	X	X		X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

le signal c'est le pic
le reste c'est du bruit-de-fond
attention ! y a du bruit-de-fond sous le pic



RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (2)

- ★ On choisit un observable et on 'compte'
 - Ex: masse invariante des deux photons

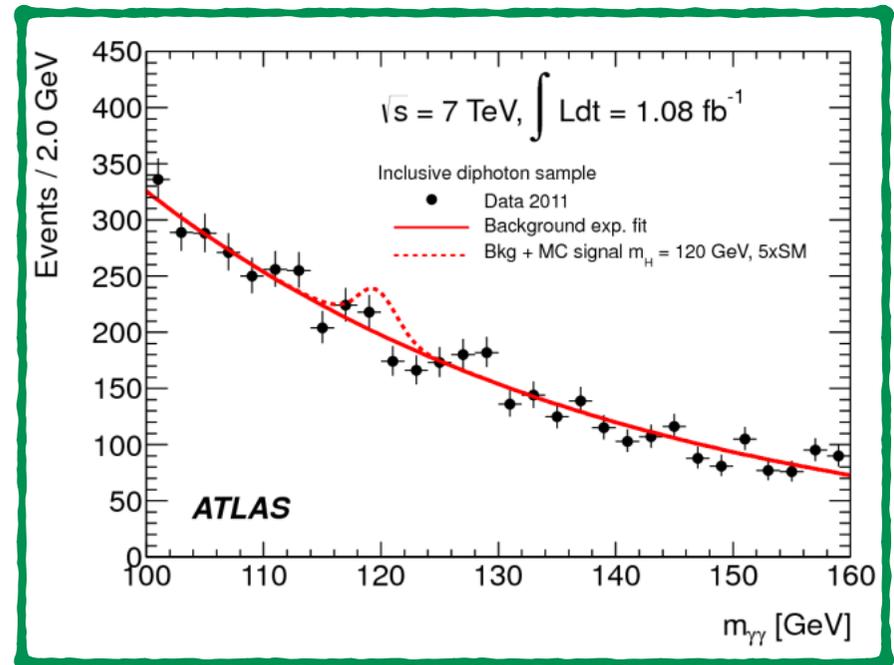
RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (2)

- ★ On choisit un observable et on 'compte'
- Ex: masse invariante des deux photons

somme des 4-moments des photons:

$$M_{\text{inv}} \sim (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

si $H \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow M_{\text{inv}} \sim M_{\text{Higgs}}$



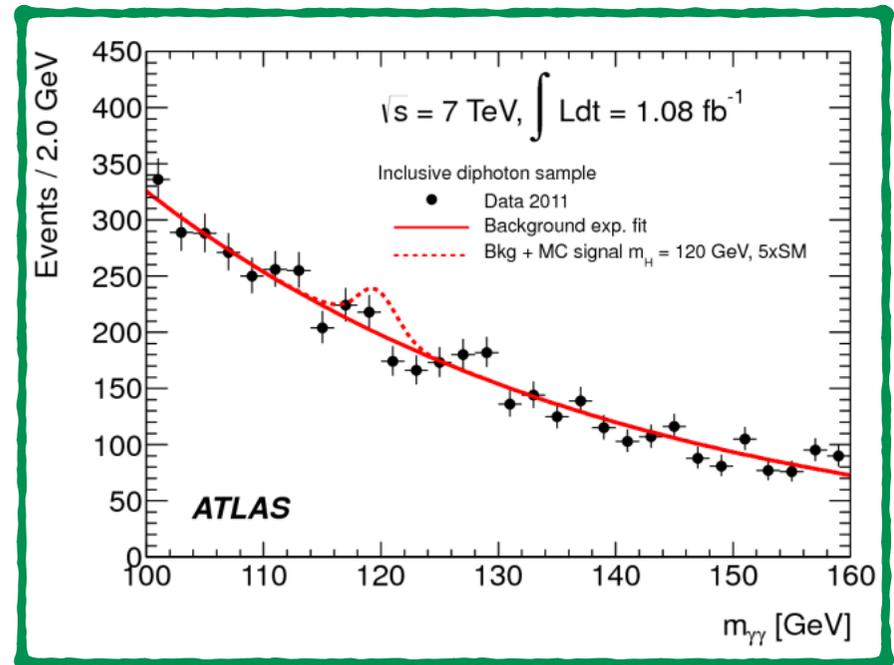
RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (2)

- ★ On choisit un observable et on 'compte'
 - Ex: masse invariante des deux photons

somme des 4-moments des photons:

$$M_{inv} \sim (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

si $H \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow M_{inv} \sim M_{Higgs}$



- ★ Interpretation: utilisation d'outils statistiques sophistiqués
 - on calcule la probabilité (p) d'obtenir ce résultat si on a du **bruit-de fond seul**

$p \sim 1 \text{ en } 350 (3\sigma) \rightarrow \text{évidence}$

$p \sim 1 \text{ en } 3.5\text{M} (5\sigma) \rightarrow \text{découverte}$

LA DÉCOUVERTE DU BOSON DE HIGGS AU LHC



Découverte
annoncée le
04/07/2012



sciences 11

Le Cern a mis la main sur le boson de Higgs

Les capteurs de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire ont détecté le nouveau Graal de la physique.

INSTANT VEU

convaincu à l'assemblée de qualification de son boson. Il a par conséquent rempli son office. Les deux expérimentateurs, Atlas et CMS, ont...

PHYSIQUE Au terme de deux présentations consécutives effectuées hier matin au Cern, à Genève, le directeur de l'Organisation, Rolf Heuer, se livre devant l'assemblée, un grand sourire aux lèvres, « à se tenir en l'air, qu'il est ce que nous en disons ». Dans une grande hâte et en un instant, il a annoncé la découverte du boson de Higgs. Les dizaines de physiciens présents dans la salle saluent en vibrant « Yes ! ». L'explosion de joie est à la mesure de la découverte. Telle est...

Ball Heuer (2^e à droite) lors d'une présentation, mercredi, à des dizaines de physiciens au Cern, à Genève.

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert Peter W. Higgs



© The Nobel Foundation, Photo: Lovisa Engblom



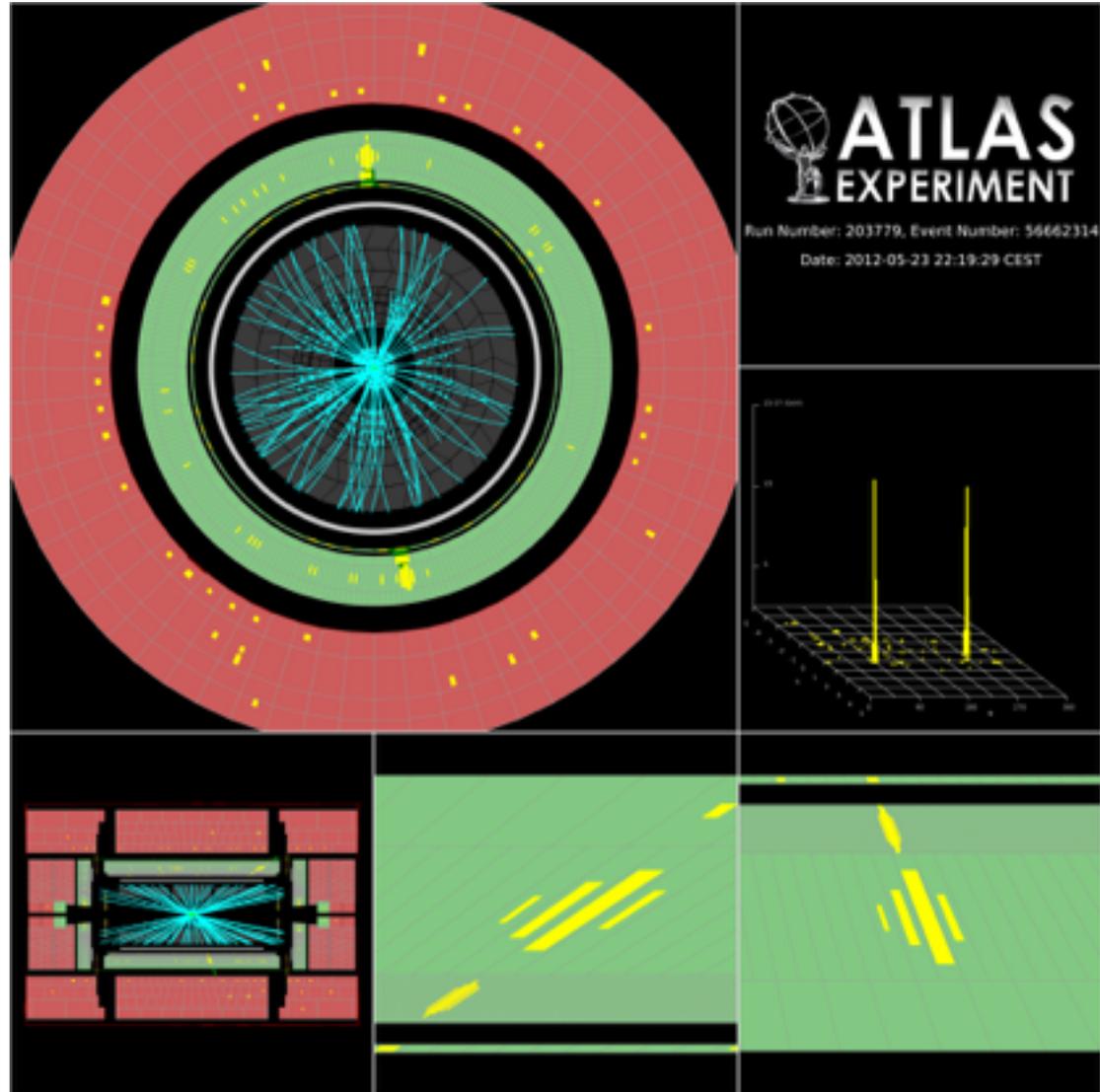
"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

JE VOUS PRÉSENTE...



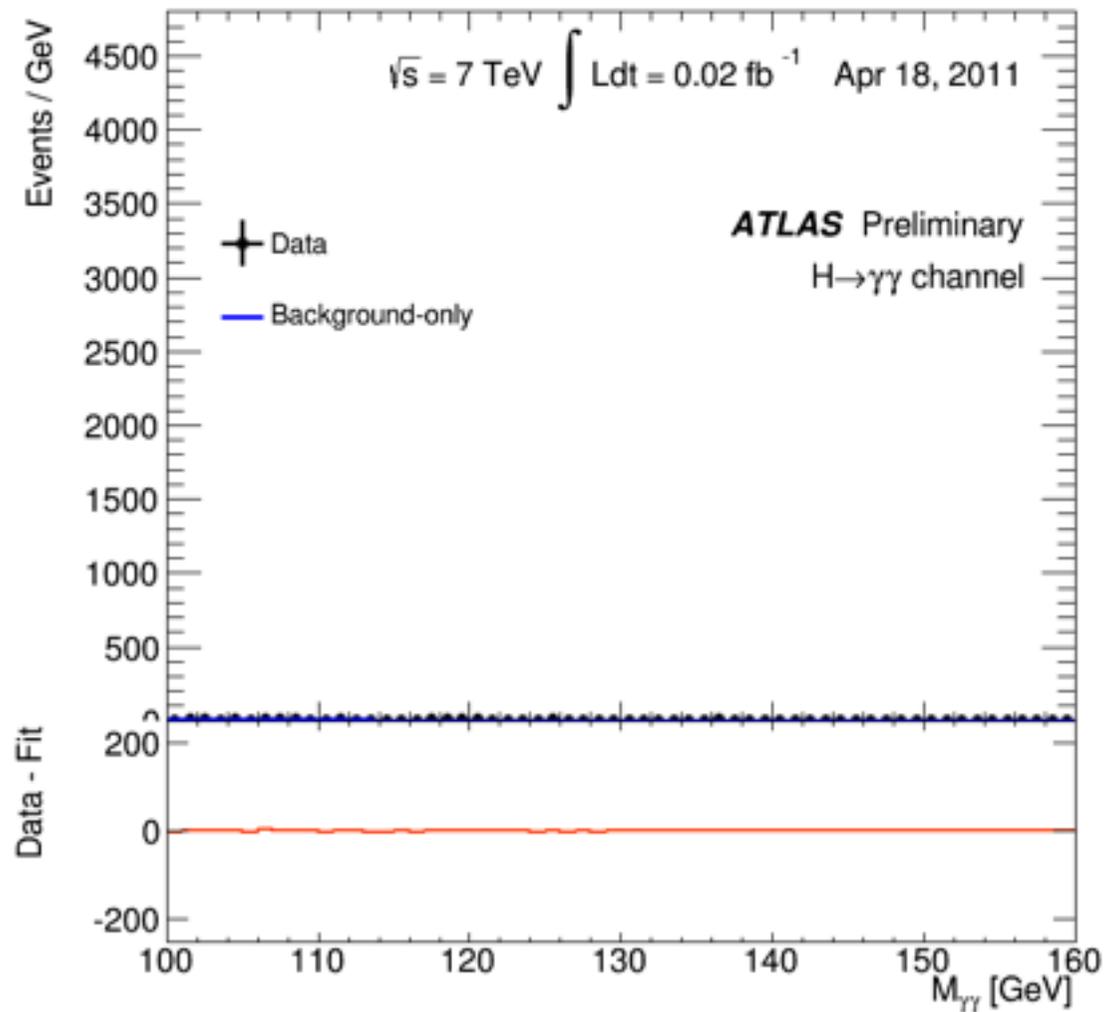
'M. Higgs'

événement $H \rightarrow \gamma\gamma$
 $M_{\text{inv}} \sim 126.9 \text{ GeV}$

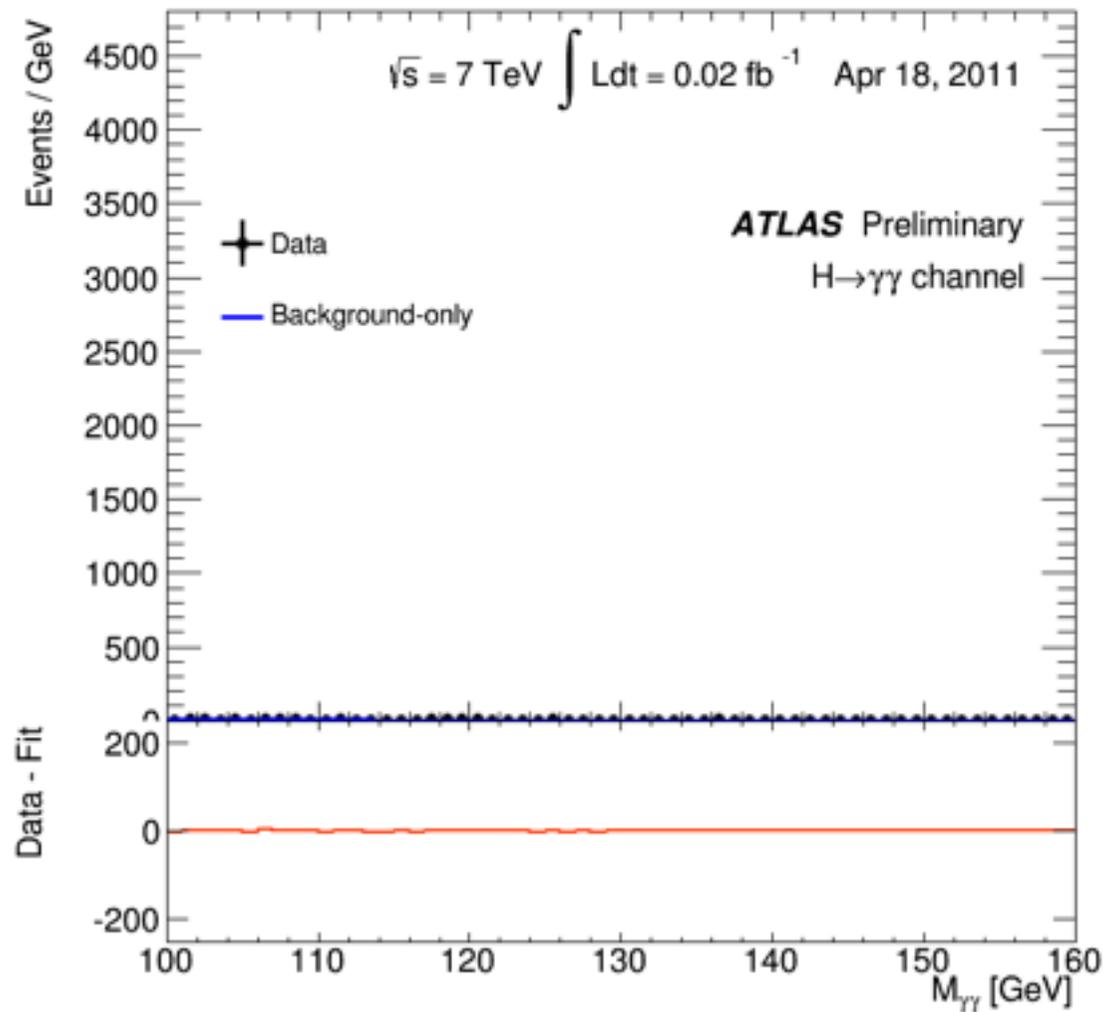


'candidat Higgs'

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE: $H \rightarrow \gamma\gamma$



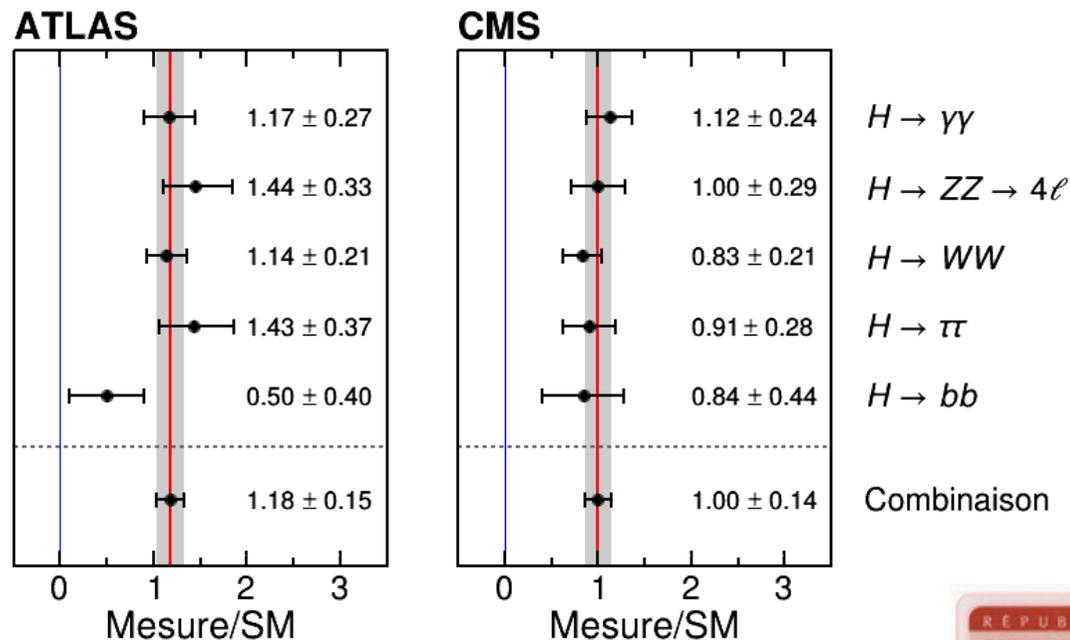
L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE: $H \rightarrow \gamma\gamma$



MESURES DES PARAMÈTRES: EST-CE UN BOSON DE HIGGS?

Il est important de vérifier que cette nouvelle particule est bien un boson de Higgs comme prévu du MS !

→ mesure des paramètres (couplages, masse, ...)



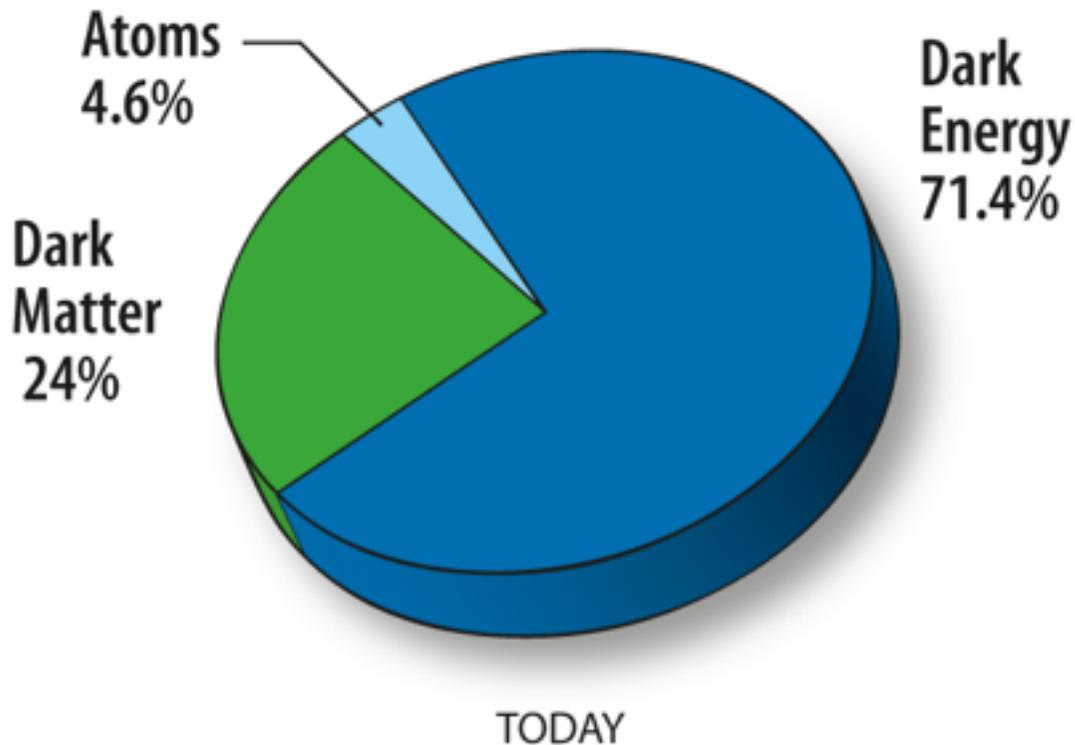
pour l'instant: mesures en accord avec les attentes, mais incertitudes statistiques encore très grandes !



PERSPECTIVES

Résultats expérimentaux en très bon accord avec la théorie !

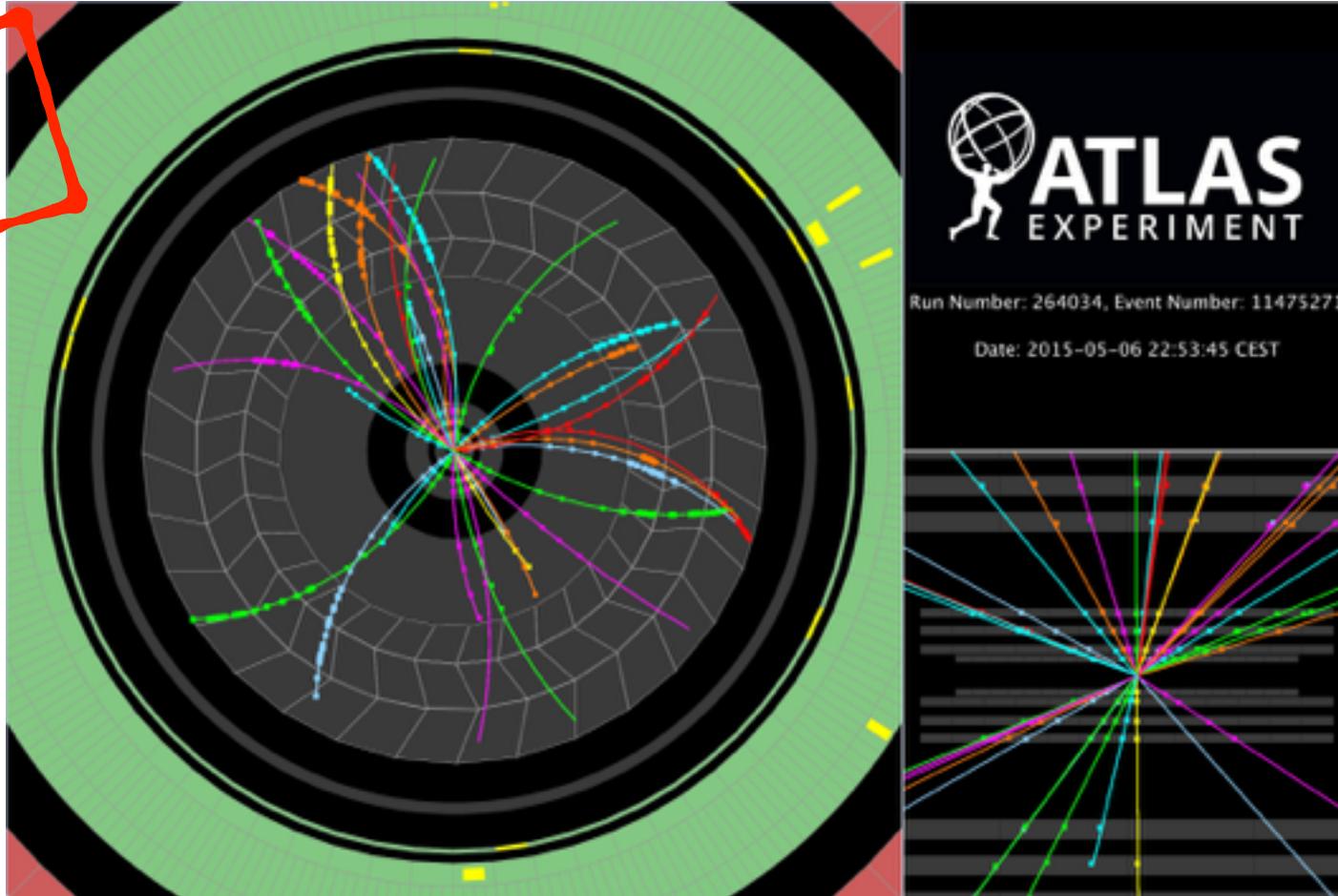
mais l'aventure n'est pas terminée !!



- Qu'est-ce que la matière noire? (sans parler de l'énergie noire..)
- Asymétrie matière-antimatière dans l'Univers?
- Grand Unification Theory ?
- ???

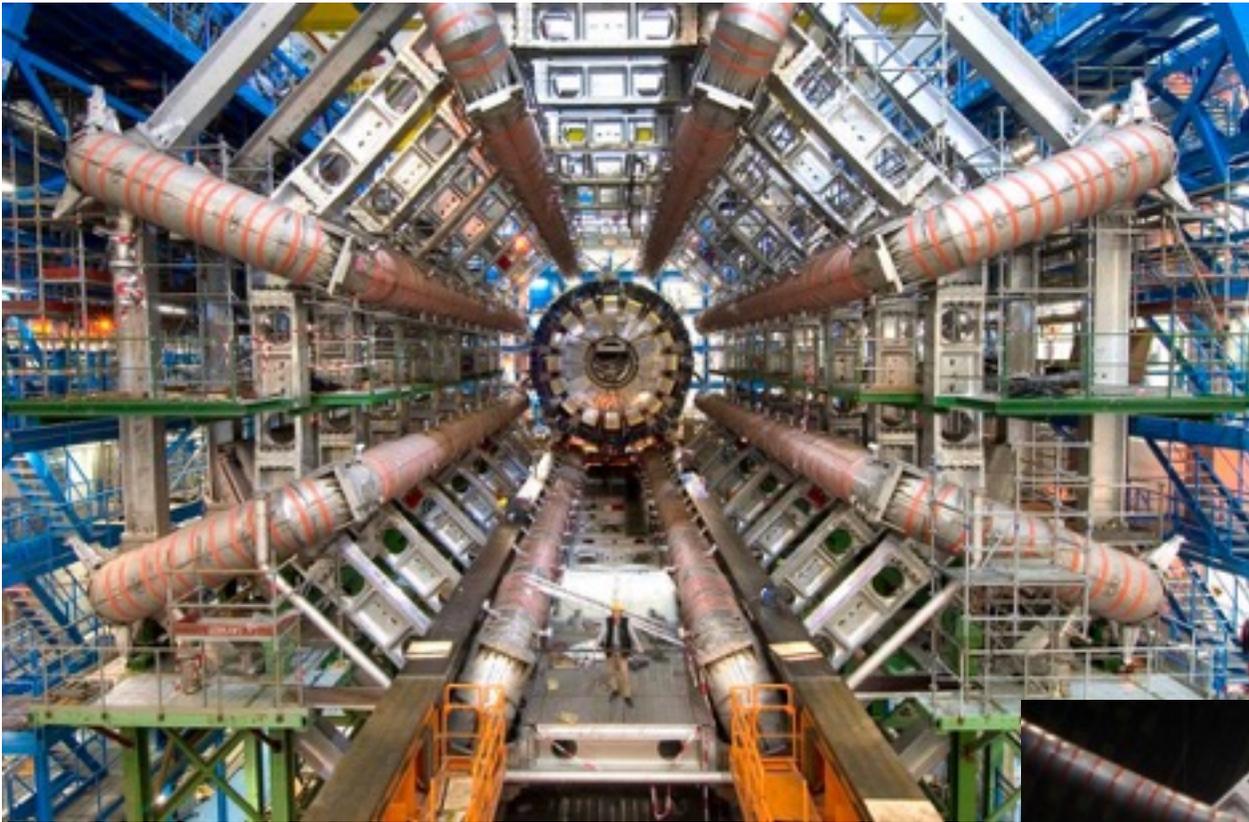
PERSPECTIVES

printemps
2015



Une nouvelle phase de prise de données à plus haute énergie, plus haute luminosité (= échantillon plus grand) a commencé !!

Merci pour votre attention !



Magnets system, ATLAS
experiment, CERN

“Les Troyens”, H. Berlioz
Palau de les Arts Reina Sofia, Valencia



BACKUP



PARENTHÈSE SUR LE SYSTÈME D'UNITÉS NATURELLES

Les unités du SI (m, Kg, s) sont adaptées à notre échelle, pas aux particules relativistes → **très petites, très rapides !**

recette pour un nouveau système d'unités

- ★ Deux grandeurs fondamentales en physique des particules:
 - vitesse de la lumière dans le vide c
 - constante de Planck \hbar
- ★ On choisit une troisième quantité indépendante: l'électron-Volt (eV)
 - **1 eV** = énergie cinétique d'un électron accéléré par un Volt
- ★ Si on veut revenir aux anciennes unités:

$$\hbar c = 197.3269631(49) \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$\hbar = 6.58211899(16) \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$$

$$1/c^2 = 1.782661758(44) \times 10^{-36} \text{ kg/eV}$$

- ★ Petit rappel: $E = mc^2$, donc $E \sim \text{eV}$, $m \sim \text{eV} / c^2$
- ★ Souvent on impose $\hbar = c = 1$

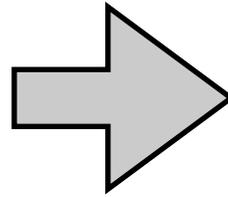
LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS EN 3 LIGNES

Mécanique Classique

particule (discret)

$$q(t)$$

$$L(q, \dot{q})$$



Théorie des champs

champ (continu)

$$\varphi(t)$$

← particule
de spin 0

$$\int \mathcal{L}(\varphi, \partial_\mu \varphi) d^3x$$

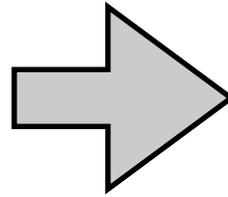
LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS EN 3 LIGNES

Mécanique Classique

particule (discret)

$$q(t)$$

$$L(q, \dot{q})$$



Théorie des champs

champ (continu)

$$\varphi(t)$$

← particule
de spin 0

$$\int \mathcal{L}(\varphi, \partial_\mu \varphi) d^3x$$

...qui a dit champ?



L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie



conservation

L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie



conservation

translation spatiale



impulsion

translation temporelle



énergie

phase



charge électrique

L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie



conservation

translation spatiale



impulsion

translation temporelle



énergie

phase



charge électrique

si la phase dépend de l'espace-temps, la symétrie est brisée!

L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie



conservation

translation spatiale



impulsion

translation temporelle



énergie

phase



charge électrique

si la phase dépend de l'espace-temps, la symétrie est brisée!



il faut introduire un nouveau champs vectoriel → les particules interagissent ! en s'échangeant des bosons